



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN
TOPOGRAFÍA, GEODÉSIA Y CARTOGRAFÍA

TITULACIÓN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA GEODÉSICA Y CARTOGRAFÍA

Especialidad: Adquisición y Tratamiento de datos Geomáticos

PROYECTO FIN DE MÁSTER

“ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL
MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR”

AUTOR:
SANTIAGO RAFAEL ROJAS UNDA

TUTOR:
IÑIGO MOLINA SÁNCHEZ
Madrid – España

Junio – 2015

DEDICATORIA

A mi hija Arlette, mi esposa Jahaira, mis padres Rafael y Olga, mis hermanos Raúl y Ximena, mi segunda madre Beatriz y mi hermana Belén, a Dios por su compañía permanente.

Cuando empecé esta travesía, estaba convencido de lograrlo solo, sin embargo con cada paso que daba me daba cuenta que mi familia siempre estaba a mi lado, y ahora al finalizar este trayecto, estoy tan convencido que jamás habría llegado hasta este lugar sin el apoyo de todos.

Cuando empecé esta travesía, cuán equivocado estaba... Ahora estoy tan agradecido por la bendición de ser parte de esta, mi gran familia.

AGRADECIMIENTOS

- A la Secretaria de Educación Superior Ciencia Tecnología e Innovación por la oportunidad brindada.
- A mi tutor Iñigo Molina por su apoyo, su amistad y su enseñanza.
- A la Universidad Politécnica de Madrid, sus autoridades y profesores.
- A todos los amigos que estuvieron presentes durante estos años.
- Inmensamente agradecido con mi Familia, Janeth, Isabel, Guadalupe, Javi, a mis primos.
- A los compañeros de clase, grandes personajes, formidables personas y admirables profesionales.
- A Xavier Molina por sus útiles consejos y su amistad.

Este final solo es el inicio de una nueva meta...

RESUMEN

La importancia de la Biomasa a nivel mundial, ha llevado a que más de 130 países celebren el protocolo de Kioto sobre el cambio climático dictaminando como objetivo la reducción de las emisiones de seis gases de efecto invernadero y tres gases industriales fluorados, así como la incorporación de la fijación del CO₂ como un objetivo dentro de los criterios de gestión de bosques. Entre las metodologías no destructivas para estimación de biomasa, aquí desarrolladas se describen tres técnicas que varios autores han propuesto para calcular los valores de biomasa y carbono, tal como el uso de ecuaciones alométricas por medio de la medición de variables dasométricas como el DAP, la aplicación de la teoría de huecos (v.g. DHP, TRAC), y la obtención de biomasa mediante información radar. Las imágenes radar proporcionan una clara ventaja al poder ser adquiridas en cualquier momento del día e independientemente de las condiciones climatológicas. Se han adquirido dos imágenes de sensores diferentes, tal como ALOSPALSAR que trabaja en la banda L y RADARSAT-2 que trabaja en la banda C, se aplica la metodología descrita por Saatchi et al. (2007), desarrollando los algoritmos semiempíricos propuestos para la estimación de biomasa del fuste (Ws) y biomasa de la copa (Wc), obteniendo los coeficientes a partir de información adquirida en campo.

ABSTRACT

The importance of biomass worldwide has led to more than 130 countries to celebrate the Kyoto Protocol, aimed at reducing emissions of six greenhouse gases and three fluorinated industrial gases, and the incorporation of the fixation of CO₂ as an objective within forest management criteria. Among the non-destructive methods for estimating biomass, three techniques were developed. These have been described by some authors, as the use of allometric equations by measuring forest variables such as the DAP, the application of the Gap Theory (e.g. DHP, TRAC), as well as deriving biomass by radar information. The radar images provide a clear advantage since they can be gathered at any time of the day regardless of the weather conditions. For this purpose, two radar products have acquired from different sensors, such as ALOSPALSAR operating on L frequency band and RADARSAT-2 operating on C frequency band. The methodology applied in this work is described in Saatchi et al. (2007), that develop semiempirical algorithms for estimating stem biomass (Ws) and crown biomass (Wc). The corresponding coefficients are determined by means of regression procedures using field information derived from allometric and radiation measurements.

ÍNDICE

RESUMEN	III
ABSTRACT.....	III
1. CAPITULO I ASPECTOS GENERALES	1
1.1. INTRODUCCIÓN.-	1
1.2. ALCANCE.-	3
1.3. OBJETIVO GENERAL.-	3
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.-	3
1.5. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.-	3
2. CAPITULO II ESTADO DEL ARTE	4
2.1. SISTEMAS RADAR.-	4
2.2. BIOMASA Y FIJACIÓN DE CARBONO.-	10
2.2.1. Biomasa forestal.-	10
2.2.2. Fijación de carbono en los bosques.-	13
2.2.3. Biomasa y fijación de carbono para los bosques en España.-	15
2.2.4. Biomasa y fijación de carbono para los bosques en Ecuador.-	16
2.3. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL.-	17
2.3.1. Métodos tradicionales para la estimación de biomasa.-	19
2.3.1.1. Ecuaciones alométricas.-	20
2.3.1.2. Factores de expansión de biomasa (BEF).-	22
2.3.2. Métodos avanzados de estimación de biomasa.-	23
2.3.2.1. Estimación de biomasa mediante sensores pasivos.-	24
2.3.2.2. Estimación de biomasa mediante sensores activos.-	37
3. CAPITULO III METODOLOGIA	44
3.1. SISTEMA Y MARCO DE REFERENCIA EUROPEO.-	44
3.1.1. Sistema de referencia terrestre internacional (ITRF).-	45
3.1.2. Sistema y Marco de Referencia Terrestre Europeo (ETRF89).-	46
3.2. ÁREA DE ESTUDIO.-	46
3.2.1. Delimitación de áreas para toma de muestras.-	48
3.2.2. Tamaño de la muestra y tipo de muestreo.-	51
3.3. MEDIDAS EN CAMPO.	54
3.3.1. Medidas del árbol.-	54
3.3.2. Medidas DHP y TRAC.-	56
3.3.2.1. Adquisición de DHP y TRAC.-	57
3.4. IMÁGENES RADAR.-	58
3.4.1. Imágenes radar del Satélite ALOS - PALSAR.-	60
3.4.2. Imágenes radar del Satélite RADARSAT-2.-	64
3.5. PREPARACIÓN Y CORRECCIÓN DE IMÁGENES.-	68
3.5.1. Corrección geométrica y radiométrica.-	68
3.6. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA.-	70
3.6.1. Modelización mediante medidas del árbol (uso de ecuaciones alométricas).-	70
3.6.2. Modelización mediante medidas DHP y TRAC.-	72
3.6.2.1. Procesamiento de datos TRAC.-	72
3.6.2.2. Procesamiento de datos DHP.-	73
3.6.3. Modelización mediante datos de microondas.-	74
4. CAPITULO IV RESULTADOS	75
4.1. APLICACIÓN DE METODOLOGÍA Y RESULTADOS.-	75
4.1.1. Metodología mediante medidas del árbol (uso de ecuaciones alométricas).-	75

4.1.2. Metodología mediante DHP y TRAC.-	77
4.1.2.1. Desarrollo mediante datos TRAC.-	77
4.1.2.2. Desarrollo mediante datos DHP.-	81
4.1.3. Metodología mediante datos de microondas.-	85
4.1.4. Análisis estadístico	91
4.2. MAPA TEMÁTICO DE IDENTIFICACIÓN DE BIOMASA FORESTAL CON SISTEMA RADAR.-	92
4.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.-	96
5. CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
5.1. CONCLUSIONES.-	97
6. CAPITULO VI BIBLIOGRAFÍA	98
6.1. REFERENCIAS.-	98
7. ANEXOS	106
ANEXO 1. ACRÓNIMOS	106
ANEXO 2. COORDENADAS DE MUESTREO.-	108
ANEXO 3. APUNTES DE DATOS EN CAMPO.-	109
ANEXO 4. ESTIMACIÓN DE BIOMASA MEDIANTE ECUACIÓN ALOMÉTRICA.-	132
ANEXO 5. RESULTADOS POR PARCELAS DE ESTUDIO MEDIANTE TRAC.-	152
ANEXO 6. ANÁLISIS DE REGRESIÓN NO LINEAL PARA IMÁGENES ALOSPALSAR.-	172
ANEXO 7. ANÁLISIS DE REGRESIÓN NO LINEAL PARA IMÁGENES RADARSAT-2.-	175
ANEXO 8. CRONOGRAMA Y PRESUPUESTOS.-	178

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama básico de un sistema radar básico	4
Figura 2.2 Radar XAF instalado en el USS New York en 1939 desarrollado por NRL.....	5
Figura 2.3 Apertura Sintética de un sistema SAR	5
Figura 2.4 Diagrama básico del sistema SAR polarimétrico CV-990.....	7
Figura 2.5 Diagrama funcional de AIRSAR.....	7
Figura 2.6 Diagrama del sistema YSAR.....	8
Figura 2.7 Satélite Sentinel-1	9
Figura 2.8 La proporción relativa de carbono (C), Agua (H ₂ O), y otros elementos (v.g. N, P, K, Ca, Mg, etc.) contenida en la a) biomasa húmeda y (b) biomasa seca	12
Figura 2.9 Troceo del arbolado, obtención de rodajas, muestras de ramas y follaje	21
Figura 2.10 Diagrama esquemático que ilustra la distribución espacial y angular para una sola hoja (β es el ángulo azimutal para esta hoja individuales que van de 0 a 360 grados, y α es el ángulo de inclinación de esta sola hoja, cuyo rango es de 0 a 90 grados).....	29
Figura 2.11 Esquema del proceso de captura de una fotografía hemisférica	31
Figura 2.12 a) Imagen sin efecto blooming b) Imagen con efecto blooming)	32
Figura 2.13 (a) fotografía hemisférica digital tomada con la exposición automática (b) fotografía digital tomada con la exposición que produce un mayor contraste.....	32
Figura 2.14 Imagen en la banda azul	33
Figura 2.15 a) Umbral de disgregación b) Imagen binarizada	33
Figura 2.16 Un ejemplo de las mediciones del TRAC a lo largo de un transecto de 20 m	35
Figura 2.17 Fracción de hueco acumulada (Fm), Fracción de hueco acumulada mediante procesos de eliminación Fmr, curva de distribución de la Fracción de hueco ajustada (Fr), la diferencia entre Fm y Fmr es el índice de aglomeración y Fm determina el PAI efectivo	35
Figura 2.18 Equipo TRAC	36
Figura 2.19 Esquema de la medida de distribución del tamaño de hueco del dosel en un transecto bajo el dosel	36
Figura 2.20 Retro-difusión volumétrica: (a) suelo, (b) tronco, (c) copa	39
Figura 2.21 Retro-difusión superficie-volumen: (a) copa-suelo (b) tronco-suelo	39
Figura 2.22 Polarimetría SAR y mediciones de Interferometría un bosque típico, con polarizaciones dominantes contribuyendo a la copa y el tallo de la superficie	42
Figura 3.1 Sistema Geodésico local	44
Figura 3.2 Dátum local y geocéntrico	44
Figura 3.3 Distribución de las técnicas de observación	45
Figura 3.4 Delimitación de parcela de muestreo	54
Figura 3.5 Configuración para la adquisición de medidas del árbol	56
Figura 3.6 Adquisición de datos basados en el protocolo Bigfoot del proyecto SIBLAI de la NASA	56
Figura 3.7 Hoja de Campo	58
Figura 3.8 Área de cobertura de Imagen ALOS-P1_1__A-ORBIT__ALPSRP072040800	64
Figura 3.9 Combinación de Pauli para imagen ALOS-P1_1__A-ORBIT__ALPSRP072040800	64
Figura 3.10 Tipos de haz emitidos por satélite RADARSAT-2.....	65
Figura 3.11 Área de cobertura de imagen RS2-SLC-FQ19-ASC-09-Oct-2008_18.12-PDS_00284020	67
Figura 3.12 Geometría de las distorsiones topográficas	68
Figura 4.1 Interfaz para procesamiento de TRAC	78
Figura 4.2 Histograma para PPFd.....	79
Figura 4.3 Calibración del centro óptico y función de proyección	81
Figura 4.4 Resultado de calibración de cámara fotográfica	81
Figura 4.5 Corrección gamma para DHP	82
Figura 4.6 Enmascaramiento de información no relevante para DHP	82
Figura 4.7 Clasificación de fotografías hemisféricas digitales.....	83

Figura 4.8 Interfaz para corrección geométrica y radiométrica de Sentinel Toolbox para imagen ALOS-PALSAR.....	85
Figura 4.9 Interfaz para corrección geométrica y radiométrica de Sentinel Toolbox para imagen RADARSAT-2.....	86
Figura 4.10 a) Imágenes ALOS-PALSAR no corregidas b) Imágenes ALOS-PALSAR ortorectificadas.....	86
Figura 4.11 a) Imágenes RADARSAT-2 no corregidas b) Imágenes RADARSAT-2 ortorectificadas.....	87
Figura 4.12 a) AlosPalsar a 100 metros de resolución b) RadarSat-2 a 100 metros de resolución, en amarillo se aprecia las parcelas estudiadas	88
Figura 4.13 Coeficiente de retrodifusión en combinaciones de polarización lineal para imagen ALOSPALSAR frente al logaritmo natural de las medidas de biomasa del fuste para 20 parcelas forestales	91
Figura 4.14 Coeficiente de retrodifusión en combinaciones de polarización lineal para imagen RADARSAT-2 frente al logaritmo natural de las medidas de biomasa del fuste para 20 parcelas forestales	91
Figura 4.15 Comparación de datos obtenidos mediante datos de campo versus valores estimados de imágenes radar.....	92
Figura 4.16 a) Coberturas forestales de imagen AlosPalsar b) Coberturas forestales de imagen RadarSat-2.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resumen de las técnicas para la estimación de biomasa.....	19
Tabla 2.2 Tipos de sensores y sus aplicaciones en el estudio de la vegetación terrestre.....	24
Tabla 2.3 Comparación de definiciones de LAI	28
Tabla 2.4 Ejemplos de estimación de biomasa con radar	40
Tabla 3.1 Cálculo de la abscisa de la curva normal para un valor determinado valor (Z).....	51
Tabla 3.2 Comparación Sistema SAR	60
Tabla 3.3 Especificaciones técnicas ALOS	61
Tabla 3.4 Características técnicas PALSAR.....	62
Tabla 3.5 Productos PALSAR.....	63
Tabla 3.6 Modos de funcionamiento PALSAR	63
Tabla 3.7 Especificaciones técnicas sistemas RADARSAT-1 y RADARSAT-2	66
Tabla 3.8 Modo de haz para RADARSAT-2.....	67
Tabla 4.1 Estimación de biomasa y fijación de carbono con de metodologías convencionales..	76
Tabla 4.2 Índices de corrección obtenidos en la copa de los árboles de dos especies de pinos...	79
Tabla 4.3 Estimación de biomasa y fijación de carbono a través de metodología TRAC	80
Tabla 4.4 Parámetros resultantes de calibración de cámara fotográfica.....	81
Tabla 4.5 Resultado mediante DHP	83
Tabla 4.6 Estimación de biomasa y fijación de carbono a través de metodología DHP para parcela 11	84
Tabla 4.7 Estimación de biomasa mediante imagen ALOSPALSAR.....	89
Tabla 4.8 Estimación de biomasa mediante imagen RADARSAT-2.....	90
Tabla 4.9 Coeficientes obtenidos para aplicación de metodología	91

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 3.1 Área de estudio.....	47
Mapa 3.2 Selección de cobertura forestal.....	49
Mapa 3.3 Cobertura forestal contenida al 25% en cada parcela	50
Mapa 3.4 Áreas de muestreo	53
Mapa 4.1 Estimación de biomasa del fuste mediante imagen radar ALOS-PALSAR.....	94
Mapa 4.2 Estimación de biomasa de la copa mediante imagen RADARSAT-2.....	95

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3.1 Medición del Diámetro a altura de pecho en Campo.....	55
Fotografía 3.2 Vista de 360° de la parcela 6 del área de estudio	56
Fotografía 3.3 Adquisición de DHP	57
Fotografía 3.4 Adquisición de medidas TRAC.....	57

ÍNDICE ECUACIONES

[1] Estimación de Carbono Total	14
[2] Función lineal de estimación de biomasa.....	21
[3] Función no Lineal de estimación de biomasa	21
[4] Función algorítmica de estimación de biomasa	21
[5] Ecuación alométrica de estimación de biomasa.....	21
[6] Ecuación alométrica linealizada con modelo logarítmico	22
[7] Ecuación de factor de expansión de biomasa.....	23
[8] Ecuación de Índice de área foliar	27
[9] Modelo de Poisson para fracción de huecos	29
[10] Ecuación de LAI efectivo	29
[11] Ecuación de Fracción de huecos	34
[12] Ecuación de Fracción de huecos total	34
[13] Ecuación para FPAR	37
[14] Ecuación para FPAR reescrita	37
[15] Mecanismos de difusión - modelo Water Cloud	42
[16] Biomasa aérea total.....	43
[17] Biomasa de la copa.....	43
[18] Biomasa del tallo	43
[19] Ángulo de incidencia local	44
[20] Tamaño de la muestra.....	51
[21] Normalización Radiométrica	69
[22] Tamaño del píxel expresada en grados	69
[23] Tamaño del píxel expresada en metros	69
[24] Ecuación logarítmica para estimación de biomasa utilizada en el modelo expresión logarítmica	70
[25] Ecuación exponencial para estimación de biomasa.....	70
[26] Factor de Corrección	71
[27] Cálculo de biomasa por hectárea	71
[28] Cálculo de CO ₂ emitido.....	71
[29] Estimación de Gap fraction por TRAC.....	72
[30] Estimación del lai a partir de lai efectivo.....	72
[31] Estimación de biomasa a partir de LAI.....	73
[32] Tamaño promedio de las sombras proyectadas del dosel.....	77



CAPITULO I ASPECTOS GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN.-

Los seres humanos desde 1850 han liberado aproximadamente 480 giga toneladas de CO₂ a la atmósfera ya sea a través de la quema de combustibles fósiles o el uso del suelo, provocando que las concentraciones de CO₂ atmosférico sean más altas que en cualquier otro momento durante los últimos veinte millones de años (Malhi, Meir, & Brown, 2002). Mientras que las emisiones de combustibles fósiles pueden dar cuenta de una parte importante de las emisiones globales de carbono, la deforestación y los incendios asociados a ellos constituyen una proporción considerable de las emisiones totales (Lu, 2006).

Los bosques desempeñan un papel importante en el ciclo global del carbono, ya que cada año estos son los responsables de absorber aproximadamente una doceava parte de CO₂ de la atmósfera terrestre (Malhi et al., 2002), gran parte de este carbono se almacena en forma de biomasa forestal. En general, los ecosistemas forestales representan aproximadamente el 72 % del almacenamiento de carbono terrestre de la Tierra (Malhi et al., 2002).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), a través de su programa FRA (Global Forest Resources Assessment) por sus siglas en inglés, coordina la evaluación de los recursos naturales desde 1946 cada 5 años, siendo a la fecha la publicación de 2010 la referencia, señala que el área total de bosque existente en el mundo asciende a algo más de 4.000 millones de hectáreas, correspondiendo al 31% de la superficie total de la Tierra es decir a un promedio de 0,6 hectáreas per cápita, siendo los cinco países con mayor riqueza forestal tal como, la Federación de Rusia, Brasil, Canadá, los Estados Unidos de América y China, representan más de la mitad del total del área de bosque. Diez países o áreas carecen totalmente de bosques y otros 54 tienen bosque en menos del 10 por ciento de su extensión total de tierra. (FAO & JRC, 2012)

De acuerdo a la evaluación realizada por el programa FRA 2010, indica que la tasa de deforestación y pérdida de bosque por causas naturales, aunque aún alarmante, se estaba reduciendo a nivel mundial, con una disminución de 13 millones de hectáreas al año en el último decenio. La Organización Internacional de Maderas Tropicales (OIMT) en el año 2009, señaló que la deforestación y degradación forestal de los bosques tropicales han reducido la calidad de muchos servicios ambientales forestales. Se calcula que el ritmo de desaparición de áreas forestales asciende a 12,9 millones de hectáreas por año, lo que ha llevado a una importante pérdida de hábitats asociados con la biodiversidad, con emisiones que representan el 18% del total de emisiones antropogénicas mundiales de CO₂. (FAO & JRC, 2012).

La biomasa adquiere una importancia trascendental en temas de conservación, aprovechamiento de energía, estimación de la fijación de carbono derivado del crecimiento de las plantas y que están directamente relacionados con los procesos de cambio climático. Por tal motivo las mediciones precisas



de biomasa y de parámetros biofísicos forestales son esenciales para lograr un mejor entendimiento del ciclo global del carbono y de las causas y efectos del calentamiento global. La información de biomasa forestal sirve en la gestión sostenible de los recursos de los bosques (Ghasemi, Sahebi, & Mohammadzadeh, 2010), también sirve para conocer el estado y la dinámica de los ecosistemas forestales y su interacción con los ciclos globales y el clima (Beaudoin et al., 1994).

Dentro del contexto de las mediciones de biomasa existen varias metodologías propuestas por diversos autores, de hecho, relativamente hasta hace pocos años, la información a escala local y regional era proporcionada por el trabajo de campo derivado de inventarios forestales, con los inconvenientes del tiempo, presupuestos (Véase Anexo 8) y dificultad en muchos casos, del acceso a la zona de estudio (Le Toan et al., 2004).

En la actualidad, se recurre a la información captada por sensores aéreos o satelitales para producir la información necesaria, con el uso de sensores ópticos, LiDAR o radar, de hecho, a escala global son el método más práctico y económico para monitorear regularmente el estado de los bosques.

La teledetección abarca una mayor observación de territorio en períodos relativamente cortos y brindando un detalle de la distribución de las especies arbóreas que no pueden aportar los inventarios forestales, también nos da la facilidad de trabajar con diferentes escalas y distintas longitudes de onda (depende del sensor), si bien la mayoría de los estudios realizados han demostrado que las bandas que contienen los rangos del espectro electromagnético del óptico e infrarrojo medio no funcionan correctamente con densidades terrestres, en el caso del radar, han sido encontradas, a través de un buen número de investigaciones, relaciones positivas entre dicha radiación y ciertas características forestales (Beaudoin et al., 1994), esencialmente los Sensores de Apertura Sintética (SAR), que representan una de las mejores alternativas para este tipo de estudios de estimación de biomasa (Luckman, Baker, & Honza, 1998), mediante el uso de la banda L que poseen algunos de los satélites de Apertura Sintética, que se ha demostrado la más adecuada para la estimación de biomasa (Fransson, Walter, & Ulander, 2000).

A través de este proyecto se pretende estimar la biomasa de un bosque que se caracteriza por una determinada especie (coníferas, *Pinus Halepensis* Mill.) ubicado en San Martín de la Vega, perteneciente a la Comunidad de Madrid - España, con la finalidad de establecer las pautas necesarias y el entrenamiento adecuado, para implicar esta metodología en un contexto de análisis de biomasa y fijación de carbono para bosques tropicales en la República del Ecuador, brindando la oportunidad de extender la investigación aquí desarrollada.



1.2. ALCANCE.-

El proyecto pretende estudiar una metodología de identificación de biomasa forestal, a través del uso de imágenes Radar de Apertura Sintética (SAR).

El desarrollo de este documento manifiesta lo aprendido durante los estudios realizados en el Máster Universitario en Ingeniería Geodésica y Cartografía, aplicando los conocimientos adquiridos para la ejecución del tema planteado, abriendo las puertas para futuras investigaciones.

1.3. OBJETIVO GENERAL.-

Analizar un método de identificación de biomasa mediante el uso de imágenes radar.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.-

Los puntos a considerar son los siguientes:

- Aplicar los conocimientos adquiridos en el Máster en Ingeniería Geodésica y Cartografía;
- Analizar una metodología de estimación de biomasa forestal mediante el uso de imágenes radar;
- Generar un mapa con la cartografía de biomasa;
- Identificar futuras líneas de investigación.

1.5. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.-

El documento se encuentra estructurado en tres partes fundamentales, en primer lugar se ha realizado un estado del arte de los sistemas satelitales con tecnología radar, priorizando los Sistemas de Apertura Sintética (SAR), posteriormente se explora la biomasa desde un punto de vista de conservación recorriendo el entorno mundial, español y ecuatoriano, y se finaliza con una introducción de algunos métodos de estimación de biomasa forestal diferenciando entre convencionales y contemporáneos, estos últimos a través del uso de tecnología SAR, priorizando en las metodologías que son aplicadas para el desarrollo del proyecto (CAPÍTULO 2).

La segunda parte del documento se enfoca en las metodología utilizadas para el cálculo de la estimación de biomasa forestal, repasando las definiciones de sistema de referencia espacial y sistemas proyección, aclarando las utilizadas en el estudio respectivo, también se define las técnicas utilizadas para el muestreo en campo así como la adquisición y preparación de la información (CAPÍTULO 3).

La tercera parte de esta estructura conlleva la presentación de resultados y la generación de un mapa temático de identificación de biomasa forestal en el área de estudio, finalizando con las futuras líneas de investigación que se pueden dar a posteriori del término de los estudios del Máster, se finaliza el documento presentado las conclusiones y recomendaciones del presente estudio realizado (CAPÍTULO 4 y CAPÍTULO 5).

CAPITULO II ESTADO DEL ARTE

2.1. SISTEMAS RADAR.-

El radar es un término que se deriva del acrónimo inglés (Radio Detection and Ranging), es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos móviles o estáticos, basando su funcionamiento en la emisión de un pulso de onda de radio, que se refleja en el objeto y se recibe en el transmisor, a partir del eco obtenido se puede extraer una gran cantidad de información (Véase Figura 2.1).

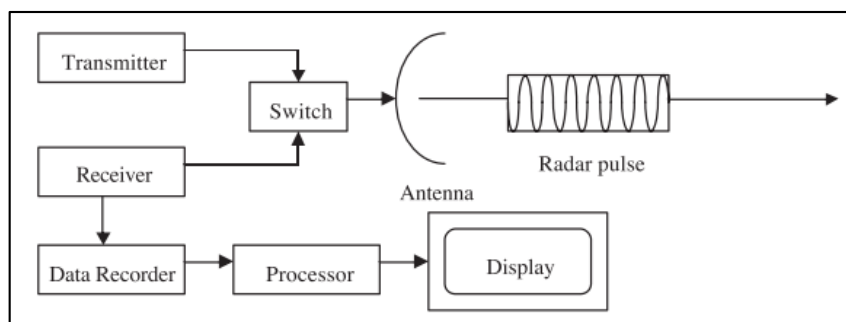


Figura 2.1 Diagrama básico de un sistema radar básico (fuente: Chan & Koo, 2008)

El Sistema Radar ha sido utilizado con fines militares y no militares en una amplia variedad de aplicaciones, tales como imágenes, orientación, teledetección, incluso para sistemas de posicionamiento global (Skolnik & Ivan, 1970). Los sistemas radar se desarrollaron como una herramienta para la detección de barcos y aeronaves durante la década de 1920. En 1922, el primer sistema de radar de onda continua se demostró por Taylor (Chan & Koo, 2008).

El primer sistema de pulso radar fue desarrollado en el año 1934 con una frecuencia de operación de 60 MHz creado por el Laboratorio de Investigación Naval (NRL), de Estados Unidos. Al mismo tiempo, los sistemas de radar para el seguimiento y la detección de aeronaves se desarrollaron tanto en Gran Bretaña y Alemania durante la década de 1930 (Chan & Koo, 2008), en la Figura 2.2 se puede observar un equipo Radar XAF, para aplicaciones militares. La primera imagen radar, se desarrolló durante la Segunda Guerra Mundial, a través de la utilización del B-Scan, equipo que produce una imagen en un formato rectangular, la relación no lineal entre el ángulo y la distancia a un lado de la aeronave produjo grandes distorsiones en la pantalla, esta distorsión se ha mejorado en gran medida por el desarrollo del Plan de indicador de posición (PPI). En la década de 1950, se desarrolló el Side Looking Airborne Radar (SLAR), las primeras versiones de los sistemas SLAR fueron utilizados principalmente para reconocimientos de fines militares. Hasta mediados de la década de 1960, es cuando la primera imagen de alta resolución SLAR fue desclasificada y puesta a disposición para uso científico (Chan & Koo, 2008).



Figura 2.2 Radar XAF instalado en el USS New York en 1939 desarrollado por NRL (fuente: Calderwood, Greenway, & Hill, 1998)

La imagen formada por el sistema SLAR tiene una baja resolución acimutal ya que cuanto menor sea el ancho de haz de acimut, más fina es la resolución del acimut. A fin de obtener una imagen de alta resolución o para emplear longitudes de onda corta se tiene que recurrir a antenas con longitudes excesivas para que el radar pueda enfrentarse a la atenuación severa de la atmósfera, restringiendo las aplicaciones aerotransportadas o satelitales por su gran tamaño y peso. Otra forma de lograr una mejor resolución de radar es el procesamiento de señales mediante el Radar de Apertura Sintética (SAR) es una técnica que utiliza el procesamiento de señales para mejorar la resolución más allá de la limitación de la apertura de la antena física (Curlander & McDonough, 1991). En los sistemas SAR, los movimientos hacia al frente de la antena real se utiliza para “sintetizar” una antena de mayor longitud y con esto obtener una apertura sintética de mayor amplitud tal como se describe en la Figura 2.3, permite la posibilidad de utilizar longitudes de onda más largas y lograr una mejor resolución con las estructuras de antena de tamaño razonable.

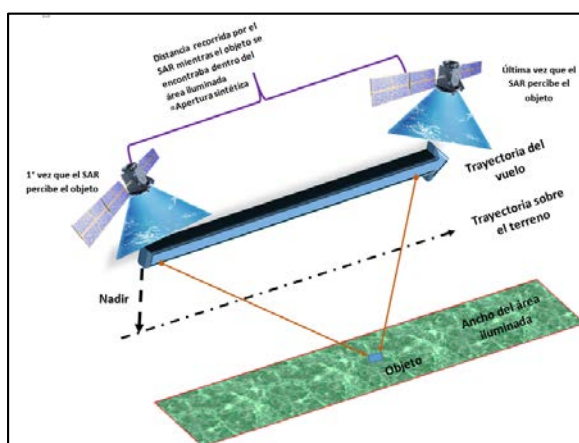


Figura 2.3 Apertura Sintética de un sistema SAR

En 1952, el sistema “Doppler beam-sharpening” fue desarrollado por Wiley de Goodyear Corporation tomando estudios realizados por el austriaco Christian Doppler, quien determinó el aparente cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento de la fuente respecto al observador, propuesto en 1842. Este sistema opera con un haz de 45° hacia adelante recreando un efecto de estrabismo,



trabajo que no tuvo ninguna implicación con el radar. Sin embargo el grupo de radar del centro de investigación de Goodyear en Litchfield, Arizona basándose en el concepto de Wiley construyó el primer sistema SAR aerotransportado a bordo de un DC-3 en 1953. El sistema radar funciona a 930MHz, utilizando una antena Yagi de abertura real con ancho de haz de 100°. Durante la década de 1950 y principios de 1960, en un desarrollo clasificado se llevó a cabo los sistemas SAR en la Universidad de Michigan y en algunas empresas. Al mismo tiempo, una evolución similar se desarrolló en otro país como Rusia, Francia y Reino Unido (Chan & Koo, 2008).

El uso de los sistemas SAR para la teledetección son adecuados para los países tropicales. Mediante la selección apropiada de frecuencias, la señal de microondas puede penetrar las nubes, neblina, lluvia y niebla así como precipitaciones con poca atenuación, lo que permite el funcionamiento en condiciones climáticas desfavorables que impiden el uso del sistema visible/infrarrojo (Ulaby, Moore, & Fung, 1983). Los sistemas SAR poseen un sensor activo, que proporciona su propia fuente de iluminación, por lo tanto, puede funcionar en el día como en la noche; capaz de iluminar con un ángulo de visión variable y abarcar una amplia área de cobertura. Además, el control de cambios en la detección de deformaciones se pueden obtener de la diferencia de fase entre las mediciones de dos haces de ondas usando la interferometría radar (Chan & Koo, 2008).

Los sistemas SAR han demostrado su utilidad en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo estudios de monitoreo marítimo, y comportamiento de capas de hielo (Kwok, Rignot, & Drive, 1990), en minería (Lynne & Taylor, 1986), monitoreo de derrames de petróleo (Hovland, Johannessen, & Digranes, 1994), oceanografía (Romeiser, 2013), monitoreo de la nieve (Storvold et al., 2006), identificación de la cobertura de suelo (H. H. Lim et al., 1989), entre otros, el potencial los sistemas SAR cubren una amplia gama de aplicaciones lo que ha conducido al desarrollo de sistemas SAR aéreos y espaciales (Chan & Koo, 2008).

Algunos sistemas de SAR se describen de la siguiente manera. Un sistema SAR polarimétrico aerotransportado fue desarrollado por la NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) denominando CV-990 (T. W. Thompson, 1986) con una longitud de onda de 24.5cm (banda L) y resolución de aproximadamente 10 metros por 10 metros. En julio de 1985, la aeronave junto con la instrumentación CV-990 SAR fue destruida durante un despegue abortado desde la Base de la fuerza aérea March en el sur de California. Después del desastre, un nuevo radar de imagen (AIRSAR) fue construido por los laboratorios JPL incorporando todas las características de SAR CV-990 (Véase Figura 2.4).

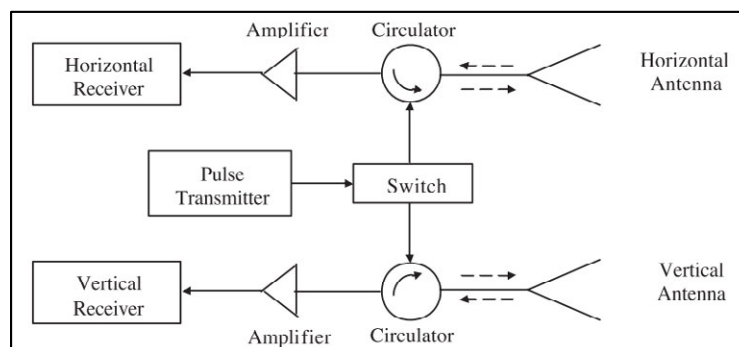


Figura 2.4 Diagrama básico del sistema SAR polarimétrico CV-990 (fuente: Chan & Koo, 2008)

El sistema SAR polarimétrico CV-990 emplea dos antenas separadas, una de polarización horizontal y otra de polarización vertical. La polarización completa se puede obtener con la transmisión de un conjunto de pulsos a través de un circuito de conmutación. Los pulsos se transmiten a través de la antena de polarización horizontal y se reciben en la misma antena, bajo el mismo concepto se transmiten los pulsos en la antena de polarización vertical. Los repetidores “circulators” permiten a una misma antena transmitir y recibir los pulsos. El sistema SAR polarimétrico CV-990 ha servido de prototipo para el resto de sensores de adquisición de imágenes radar que operan en la actualidad y para el sistema de vehículos espaciales propuestos por la NASA en la operación de 1990 (Chan & Koo, 2008).

El sistema AIRSAR se construyó sobre la base del sistema SAR CV-990 L-band y fue ampliado para incluir las banda P de 440MHz y la banda C de 5300MHz (Held et al., 1988). El sistema es capaz de producir datos totalmente polarimétricos de las tres frecuencias simultáneamente. Recoge los datos de las polarimetrías HH, HV, VH y VV en las tres frecuencias con una resolución de aproximadamente 10 metros (Véase Figura 2.5 que muestra el diagrama funcional de AIRSAR) (Chan & Koo, 2008).

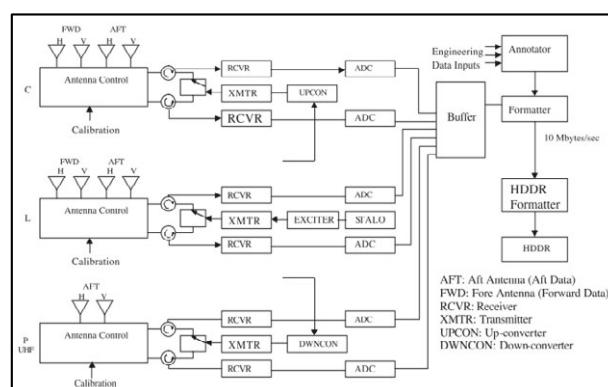


Figura 2.5 Diagrama funcional de AIRSAR (fuente: Chan & Koo, 2008)

Uno de los sistemas SAR de bajo costo es el sistema Brigham Young University SAR (YSAR) (D. G. Thompson et al., 1997). El Sistema SAR típico es complejo, costoso y difícil de transportar, pero el YSAR es relativamente barato y ligero. Este sistema puede volar en cuatro o seis aviones de pasajeros a altitudes de hasta 2.000 metros. (Véase Figura 2.6 del diagrama simplificado de YSAR).

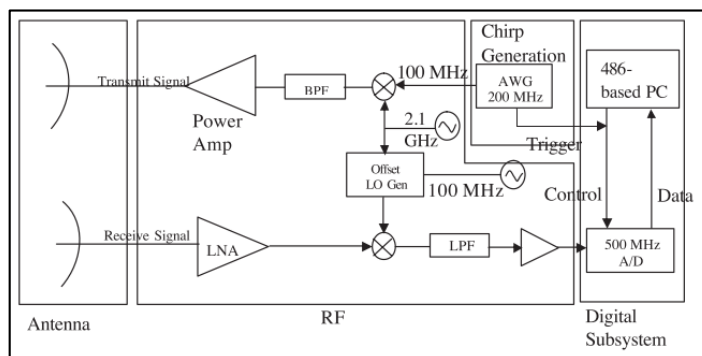


Figura 2.6 Diagrama del sistema YSAR (fuente: Chan & Koo, 2008)

Existen muchos otros sistemas SAR aéreos y satelitales que están diseñados por agencias gubernamentales, instituciones de investigación y la industria privada. CCRS C / X-SAR es un sistema multi-frecuencia, con polarización múltiple aerotransportado desarrollado por Centro Canadiense de Percepción Remota (CCRS) (Hawkins, 1990). El sistema opera en la banda C y X tanto en polarización horizontal y vertical. Sandia National Laboratories desarrolló un sistema multi-modo denominado Twin-Nutria SAR capaz de operar en cuatro bandas: banda Ka, banda Ku, banda X y VHF / UHF (B. Walker et al., 1996). IFSARE desarrollado por el Instituto de Investigación Ambiental de Michigan (ERIMM) es un sensor de banda X y una sola polarización (HH) de interferometría SAR capaz de generar medidas de hasta una altura de 1 a 3 metros de precisión (Birk, Camus, Valenti, & McCandless, 1995). C-band, de polarización simple (VV) es un sistema danés SAR desarrollado por el Instituto de Electromagnetismo de la Universidad Técnica de DeMark (Madsen, Christensen, Skou, & Dall, 1991). Los sistemas STAR-1 y STAR-2 son dos sistemas aerotransportados comerciales operados por Intera Technologies de Calgary (Birk et al., 1995). El satélite europeo de teledetección de la Tierra (ERS-1) desarrollado por la Agencia Espacial Europea (Way & Smith, 1991) opera en la banda C con una polarización (VV). También se tiene el satélite japonés para Recursos Terrestres-1 (JERS-1) que es un satélite japonés operacional con sistemas SAR que opera en la banda L con una polarización (HH) (Nemoto, Nishino, Ono, & Mizutamari, 1991). EL Shuttle Imaging Radar de Apertura Sintética (SIR) experimento desarrollado en cooperación entre la NASA, la Agencia Espacial Alemana (DARA), y la Agencia Espacial Italiana (ASI) dispone de múltiples frecuencias, multipolarización SAR que opera en las bandas L, C y banda X proporcionando polarizaciones (HH), (VV), (HV) y (VH) (R. L. Jordan, Huneycutt, & Werner, 1993) (Chan & Koo, 2008). EL Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) y LightSAR desarrollado por la NASA, SRTM tiene el respaldo de la NASA y de la Agencia Nacional de Imágenes y Mapas (NIMA) provee de un mapa de elevación global y LightSAR utiliza tecnología emergente para reducir costos de materia prima y de ciclo de vida, con la finalidad de adquirir datos SAR para ciencias de la Tierra y aplicaciones civiles estableciendo su utilidad comercial (Hilland et al., 1998). Terrasar-X y Tanden-X desarrollado por EADS Astrium de Alemania tiene una separación en el espacio de unos cientos de metros entre ambos, operan en la banda X con multipolaridad (Heer, Fischer, & Schaefer, 2010). SAR-Lupe (Alemania) con una constelación de 5

satélites. Cosmo-SkyMed (Italia) que abarca una constelación de 4 satélites. TecSar (Israel) (España) que mantiene acuerdos de intercambio de datos con Terrasar-X. ALOS PALSAR satélite sucesor al JERS-1, puesto en órbita por JAXA's Tanegashima Space Center en enero de 2006, opera de manera sincronizada con el sol a una altura de 691 kilómetros con una recurrencia de 46 días, tiene tres instrumentos tal como el sensor remoto pancromático para realizar un mapeo stereo (PRISM), radiómetro avanzado de visible e infrarrojo cercano tipo 2 (AVNIR-2), y un sistema SAR que opera con banda L (Börner et al., 2007). Existiendo a la actualidad aun una gran cantidad de sistemas Radar para usos comercial, científico o militar, aunque la mayoría de estos sistemas se han diseñado y operado para la aplicación científica.

La investigación y desarrollo de los sistemas SAR mantiene un continuo crecimiento y existen muchas misiones planificadas a futuro para poner a disposición nuevos equipos, instrumentos, sensores, plataformas entre ellas tenemos: Sentinel-1 (Véase Figura 2.7) que está siendo desarrollado por un consorcio industrial liderado por Thales Alenia Space de Italia, como contratista principal, con Astrium de Alemania como responsable del instrumento SAR, incorporando el sub-sistema electrónico SAR (SES) desarrollado por Astrium de Reino Unido, opera en banda-C (Ludwig et al., 2011), este será el primero de la flota de satélites Copernicus que la Agencia Espacial Europea pondrá en órbita tendrá aplicaciones de monitoreo de hielo marino, derrames de petróleo, olas y vientos marinos, uso y cobertura de suelo, deformaciones terrestres, así como brindar una herramienta útil en respuestas emergentes en caso de inundaciones o terremotos, el lanzamiento de Sentinel 1-A realizado en abril de 2014 y Sentinel 1-B para 2015.



Figura 2.7 Satélite Sentinel-1 (fuente: Ludwig et al., 2011)

En respuesta a la necesidad urgente de mejorar la cartografía de la biomasa global y la falta de sistemas capaces de hacer frente a esta necesidad, la misión BIOMASS fue propuesta por la Agencia Espacial Europea para el tercer ciclo de misiones Earth Explorer Core y fue seleccionado para el Estudio de Factibilidad (Fase A), en marzo de 2009. Los objetivos de la misión son: 1) para cuantificar la magnitud y distribución de la biomasa forestal a nivel mundial para mejorar la evaluación de recursos, contabilidad de carbono y modelos de carbono, 2) monitorear y cuantificar los cambios en la biomasa terrestre forestal



a nivel mundial, sobre una base anual o mejor (Le Toan et al., 2011). La misión BIOMASS consiste en un sistema polarimétrico que funciona a una frecuencia central de 435 MHz en banda P con un ancho de banda de 6 MHz. Las mediciones serán tomadas en ángulos de incidencia de 23 a 31 grados. Para habilitar las mediciones en una escala comparable a la de la deforestación y la perturbación de los bosques (es decir, alrededor de 1 ha), se prevé que sistema BIOMASS proporcione productos nivel-1 con alrededor de 50 metros por 50 m de resolución. El satélite deberá volar en una órbita sincronizada con el sol para reducir al mínimo perturbaciones de la ionosfera, usará Técnicas de Pol-InSAR. El tiempo de revisita será de entre 25-45 días para mantener una alta coherencia temporal su lanzamiento está previsto para el año 2020 (Scipal et al., 2010).

2.2. BIOMASA Y FIJACIÓN DE CARBONO.-

2.2.1. Biomasa forestal.-

De acuerdo a la Real Academia Española (RAE) se define, biomasa como la materia total de los seres vivos que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o volumen. Siendo esta una representación ecológica al determinar el índice individual de la actividad de los organismos vivos, dentro de un ecosistema. Otra acepción de la RAE respecto a la biomasa hace referencia a la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Es una noción más reciente y más restringida donde la biomasa es la materia orgánica que puede ser convertida en combustible y es por lo tanto considerada como una fuente potencial de energía. Esta definición ha ido en aumento, y así la biomasa es definida en función de su procedencia, como la fracción biodegradable de los productos, subproductos y residuos procedentes de la agricultura (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal). (García & Martínez, 2014; Rodríguez Vázquez de Aldana, García Criado, García Ciudad, & Zabalgogezcoa, 2012).

Atendiendo a la procedencia la biomasa se puede clasificar en:

- *Biomasa Natural*: Es el resultado directo de la actividad fotosintética de los vegetales;
- *Biomasa Forestal*: Es la que procede del cultivo de madera, mediante prácticas silvícolas, de los restos de madera y de la limpieza de montes y/o bosques;
- *Biomasa Residual*: La biomasa natural no es utilizable en su totalidad lo que conlleva la generación de residuos sobrantes de la misma, es decir aquella que procede de residuos ganaderos, residuos agrícolas (v.g. restos de cereal, algodón, etc.), restos arbustivos y leñosos (de podas, cambio de variedad / especie) y residuos industriales (v.g. madera de rechazo, lignina residual, etc.) (Grupo Empresarial ENCE, 2009; Neches Olaso, 2011).

La biomasa tiene una gran importancia en lo que a la historia de las fuentes de energía se refiere, ya que existen pruebas de que fue la primera energía en ser utilizada por el ser humano. Siendo pionera de

muchas actividades del ser humano, ya que quemaba la biomasa para cocinar, para calentarse y actividades muy variadas.

La importancia de la Biomasa a nivel mundial, generalmente ha sido por su interés energético, y las ventajas que esta tiene como energía renovable, a partir de la fijación de la energía solar en la fotosíntesis, comprendiendo toda la materia orgánica, ya sea de origen vegetal o animal, incluyendo materiales procedentes de su transformación sea natural o artificial, sin embargo la relación entre la biomasa con la fijación del CO₂ y su influencia positiva en el cambio climático global no era considerada como un tema de interés mundial.

El interés mundial por el cambio climático llevó a que más de 130 países celebren el protocolo de Kioto sobre el cambio climático adoptado el 11 de diciembre de 1997, dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC), y que entró en vigor el 16 de febrero de 2005, el mismo que dictamina como objetivo la reducción de las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5 %, dentro del periodo que va de 2008 a 2012, en comparación a las emisiones a 1990, Por estos motivos, se propuso la incorporación de la fijación del CO₂ como un objetivo dentro de los criterios de gestión de bosques.

Los cambios en la cobertura, en el uso y manejo de los bosques, producen fuentes y sumideros de dióxido de carbono hacia y desde la biosfera. Para estimar la magnitud de estas fuentes y sumideros se requiere estimaciones fiables de densidad de biomasa en los bosques que se encuentran sometidos a un proceso de cambio (Brown, 1997).

Desde el punto de vista de conservación, y fijación de carbono, intereses de este proyecto, aquí se considera conjuntamente la biomasa natural y forestal. Los bosques son determinantes para la estimación de biomasa por su importancia en los ciclos biogeoquímicos globales, especialmente el ciclo del carbono y su relación con el efecto invernadero, considerando que los bosques y zonas arboladas constituyen algo menos que la mitad de biomasa de la Tierra.

Es así como la biomasa se refiere al peso o masa del tejido de una planta o árbol vivo y es generalmente expresada en unidades de toneladas métricas (t). En este contexto la biomasa puede ser clasificada en:

- Biomasa aérea, es decir aquella que analiza los componentes sobre el suelo (i.e. hojas, ramas y tallo);
- Biomasa bajo el suelo, aquella que considera los elementos que se encuentran debajo del terreno (v.g. raíces).

Lo más común es estimar la biomasa aérea de un árbol, de una especie, o de un bosque característico, determinando el peso del tejido vivo de la planta sobre el suelo después de que toda el agua haya sido removida, es decir, después de que las hojas, ramas y tallos se hayan secado por completo, a menudo utilizando un horno especial de laboratorio. En general, el agua representa aproximadamente el 50% o la mitad del peso (biomasa húmeda) de un árbol vivo, tal como se describe en la Figura 2.8.

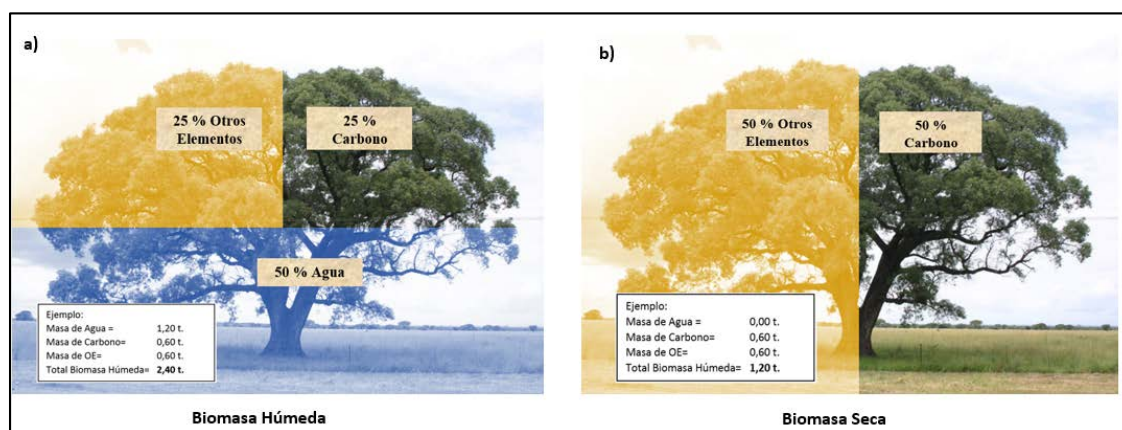


Figura 2.8 La proporción relativa de carbono (C), Agua (H₂O), y otros elementos (v.g. N, P, K, Ca, Mg, etc.) contenida en la a) biomasa húmeda y (b) biomasa seca

Como se ha indicado, gran parte de la biomasa terrestre se encuentra almacenada en los bosques y zonas boscosas, siendo los bosques muy importantes en temas relacionados con el cambio climático global, especialmente en el ciclo de carbono y su relación con el efecto invernadero. La biomasa de los bosques proporciona certeras estimaciones de las reservas de carbono en la vegetación forestal ya que aproximadamente el 50% de la misma es de carbono. En consecuencia, la biomasa representa la cantidad potencial de carbono que puede ser añadido a la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂) cuando el bosque es talado y/o quemado. La comunidad científica sigue desarrollando diversos modelos que evalúan la contribución de la deforestación tropical y la quema de biomasa, a fin de determinar el aumento del CO₂, y otros gases (Brown, Gillespie, & Lugo, 1989; Brown, 1997).

Se ha comprobado que el CO₂ es el principal responsable del efecto invernadero, causante del cambio climático, a pesar que solo representa el 0,03% de los gases de la atmósfera. Las dos principales vías para frenar el calentamiento del Planeta son la disminución de emisiones y el aumento de la fijación de CO₂. (Montero, Ruiz Peinado, & Muñoz, 2005).

Otra cuestión relacionada con la biomasa surgió desde la década de 1980, donde además de la pérdida de superficie forestal, y la degradación de los bosques, se reafirmó la pérdida de la densidad de biomasa a nivel mundial, (Brown, Iverson, & Lugo, 1994; FAO, 1993, 1995). Gran parte de esta pérdida de biomasa se debe a la tala ilegal de los bosques, la misma que no tiene ningún control o registro de tal actividad [v.g. bosques tropicales de Asia (Schloenhardt, 2008)]. Este proceso de pérdida de densidad de biomasa tiene implicaciones que afectan en el ciclo global del carbono, en ciclos biogeoquímicos, y en la

biodiversidad. La degradación de la biomasa se debe a muchas causas, pero en su mayoría están relacionadas con factores sociales, económicos y políticos (Brown, 1997).

2.2.2. Fijación de carbono en los bosques.-

En la filosofía natural de la Antigüedad, de los cuatro elementos conocidos se dice que el aire es el más espiritual e imperceptible. Los pensadores griegos del siglo VI a.C. sostenían que la respiración era el espíritu de la vida, lo que convertía al aire en el elemento fundamental de la Tierra. Lo mismo que el alma, que es aire, mantiene unido al cuerpo, el viento y el aire envuelven al mundo, afirmaba Anaxímenes de Mileto. Los estudios científicos del siglo XVII demostraron que el aire no era una sustancia espiritual sino una sustancia física tangible. Las ciencias químicas demostraron después que se trataba de una mezcla de gases entre los cuales el nitrógeno y el oxígeno eran los más abundantes, posteriormente la meteorología ha demostrado que la atmósfera, equilibra los procesos de calor y frío y transporta el vapor de agua de los océanos a los continentes mediante la circulación atmosférica, equilibrando el clima de la Tierra (Montero et al., 2005).

La concentración de carbono en los últimos 200 años ha ido en incremento, desde 280 a 360 ppm en la atmósfera, con una tasa de crecimiento promedio de 1 ppm al año (Keeling, Whorf, Wahlen, & Van der Plicht, 1995; Siegenthaler & Oeschger, 1987), el aumento se debe a la quema de combustibles fósiles, a la tala de bosques y al cultivo desmedido. Actualmente se liberan anualmente cerca de 5,7 giga toneladas., de carbono a la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles, y una cantidad aproximada de 2,0 giga toneladas., de carbono liberados a la atmósfera producto de procesos en el cambio de uso de suelo, ya sea por deforestación para pastizales o áreas de cultivo (Deans, Moran, & Grace, 1996). La capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Schulze, Wirth, & Heimann, 2000). La determinación de esta capacidad constituye un reto cuando se trata de evaluar el potencial de sistemas forestales, naturales, alterados o introducidos por el hombre (Acosta Mireles, Vargas Hernández, Velázquez Martínez, & Etchevers Barra, 2002).

El llamado elemento primario de la vida es el carbono siendo el componente fundamental de todos los compuestos orgánicos. Sin embargo, la cantidad de carbono es limitada, por lo que se recicla constantemente, mediante la fijación del carbono atmosférico a través de los procesos de fotosíntesis de las plantas y su liberación por la respiración de las mismas.

Las plantas verdes fijan el carbono de la atmósfera que pasa a formar parte de su biomasa. La respiración de los bosques, el desfronde (i.e. caída natural de biomasa procedente de la parte aérea de árboles, arbustos y matorrales: hojas, frutos, ramillos, corteza, etc., de forma periódica y que contiene una gran parte de los nutrientes extraídos del suelo por el vegetal), el desprendimiento de los órganos



reproductivos y la muerte de los árboles devuelven a la atmósfera parte del carbono absorbido mediante la fotosíntesis (Montero et al., 2005). El balance entre el carbono acumulado en el árbol, como resultado de su crecimiento, y el liberado por el desprendimiento y descomposición de hojas, ramas, frutos, cortezas, etc., determina la fijación neta de carbono por el árbol. El mismo razonamiento puede hacerse cambiando el concepto de árbol por el de masa forestal, incluyendo aquí el balance neto de todas las especies vegetales que lo componen: árboles, arbustos, matorrales y herbáceas (Montero et al., 2005).

La superficie de la tierra ocupada por los bosques representa casi el 30% de la superficie emergida de ésta, unas 3.871×10^9 has. Se estima que aproximadamente el 80% del carbono contenido en la biomasa aérea de toda la vegetación mundial y un 40% del carbono contenido en raíces, residuos y suelos se encuentra en los ecosistemas forestales (Dixon, Winjum, & Schroeder, 1993).

De tal manera se puede afirmar que los bosques actúan como sumideros, ya que almacenan grandes cantidades de carbono durante periodos prolongados en sus tejidos (madera), e incrementan su biomasa conforme a su crecimiento, pero también son fuentes de emisión, debido a la mortalidad natural, a los incendios, al desfronde y a otros procesos como la descomposición y oxidación de productos forestales (Montero et al., 2005). Para estimar la fijación de carbono de manera unitaria se clasifica en cinco grupos (Ordóñez, De Jong, & Masera, 2001).

- Carbono fijado en la vegetación (Cv): Carbono contenido en la biomasa viva aérea y radical;
- Carbono en descomposición (Cd): Es el contenido en la materia orgánica que se encuentra en proceso de descomposición depositada sobre el suelo, pero no incorporada al suelo mineral;
- Carbono en el suelo (Cs): Es el carbono contenido en los horizontes que forman el perfil del suelo, originado por la meteorización de la roca madre y por la descomposición de restos vegetales, como humus estable;
- Carbono en productos (Cp): Es el carbono contenido en productos forestales durante el tiempo que el producto está en uso (v.g. productos derivados de la vegetación o de la madera de los árboles);
- Carbono ahorrado por sustitución de combustibles fósiles (Cf): Uso de biomasa forestal para la producción de energía.

Cada uno de estos almacenes de carbono puede referirse a una unidad superficial. De tal manera que el carbono total (Ct) será la suma del carbono acumulado tal como se expresa en la siguiente ecuación [1].

$$C_t \approx C_v + C_d + C_s + C_p + C_f \quad [1]$$

2.2.3. Biomasa y fijación de carbono para los bosques en España.-

La Unión Europea, como agente especialmente activo en la concreción del Protocolo de Kioto, se comprometió a reducir sus emisiones totales medias durante el periodo 2008-2012 en un 8 % respecto de las de 1990. No obstante, a cada país se le otorgó un margen distinto en función de diversas variables económicas y medioambientales, según el principio de reparto de la carga. Dentro de este contexto España se comprometió a limitar el aumento de sus emisiones un máximo del 15 % en relación al año base, en vista de tales medidas mediante el Real Decreto 376/2001, de 6 de abril (Boletín Oficial del Estado número 84, de 7 de abril de 2001) se creó la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) como órgano colegiado dependiente de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente para desarrollar las políticas relacionadas con cambio climático, posteriormente en el artículo 11 del Real Decreto 1823/2011, de 21 de diciembre, se reestructuran los departamentos ministeriales, creando el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente estableciendo al Ministerio como órgano superior, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente, permitiendo establecer los mecanismos de flexibilidad y sumideros pactados en el protocolo de Kioto, estos mecanismos se basan en el carácter global del reto del cambio climático y permiten que los países con compromisos en materia de reducción y limitación de emisiones puedan alcanzar sus objetivos reduciendo las emisiones en otros países firmantes del protocolo. El objetivo perseguido es doble, facilitando el cumplimiento de compromisos de reducción y limitación de emisiones, y apoyando el desarrollo sostenible de los países en desarrollo a través de la transferencia de tecnologías limpias. De tal manera que se considera la fijación de carbono a través de sumideros definiendo a estos como todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. Las formaciones vegetales actúan como sumideros por su función vital principal, la fotosíntesis (proceso por el que los vegetales captan CO₂ de la atmósfera o disuelto en agua y con la ayuda de la luz solar lo utilizan en la elaboración de moléculas sencillas de azúcares). Mediante esta función, los vegetales absorben CO₂ que compensa las pérdidas de este gas que sufren por la respiración y lo que se emite en otros procesos naturales como la descomposición de materia orgánica, determinando así la importancia de la estimación de la biomasa en los bosques, con la finalidad de dar el cumplimiento a los objetivos planteados en el protocolo (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2006).

Para el cálculo de la cifra de potencial de absorción por las actividades de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura en España, en el periodo 2008-2012, se contabilizó la absorción producida por actividades de forestación y reforestación y el aumento de los stocks de carbono debido a la gestión de tierras agrícolas y la gestión de bosques. Para la realización de este cálculo se utilizaron las Guías de Buenas Prácticas para Uso de la Tierra, Cambios de Uso de la Tierra y Silvicultura elaboradas por el Panel Intergubernamental de expertos de Cambio Climático (IPCC) en 2003. En el caso de los datos de gestión



de tierras agrícolas se han utilizado factores de conversión extraídos de documentación especializada (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2006).

Conscientes de la importancia y la necesidad de estimar la biomasa y su relación con la fijación de carbono que esta tiene, principalmente en los bosques como se ha indicado anteriormente, el Centro de Investigación Forestal (CIFOR) del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), con la colaboración de la Dirección General para la Biodiversidad (DGB) y la empresa pública EGMASA de la Junta de Andalucía, realizaron los trabajos necesarios para estimar la capacidad de fijación de CO₂ por las principales especies forestales de los bosques españoles aportando información sobre la capacidad de producción de biomasa de las principales especies forestales que puede ser utilizada con fines energéticos, además de servir como dato de partida para estimar la fijación y el balance de CO₂ en los bosques españoles (Montero et al., 2005).

De acuerdo a trabajos realizados de estimación de biomasa y fijación de carbono, demuestra que los bosques españoles fijan actualmente alrededor del 19% de las emisiones totales de CO₂ producidas en España, siendo trascendentales en el ciclo del carbono. Así mismo, estos bosques tienen almacenado más de 2.858 millones de toneladas de CO₂, constituyendo un reservorio de gran importancia que es preciso gestionar para disminuir el riesgo de incendios y como consecuencia las emisiones de grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Los bosques españoles almacenan más de 1.593 millones de toneladas de biomasa (materia seca) en el año 2004, parte de las cuales podrían transformarse en energía renovable (Montero et al., 2005).

2.2.4. Biomasa y fijación de carbono para los bosques en Ecuador.-

La República del Ecuador se expande sobre un área total de 255.234 Km², de la que cerca del 50% está cubierta por bosques (Sierra, 1999), principalmente bosques siempre verdes de la Amazonía, los pies de monte andinos y los Andes. Más de 6,8 millones de hectáreas de bosque pertenecen a pueblos ancestrales, comunidades indígenas y comunidades afro ecuatorianas. La mayoría de estas tierras se sitúan en la región amazónica del país y en la provincia de Esmeraldas. De acuerdo a datos de la FAO (2009), Ecuador está entre los países con mayores tasas de deforestación en Latinoamérica, siendo del 1,7% entre los años 2000 y 2005 a diferencia del 1.5% entre los años 1999 y 2000 (Bertzky et al., 2011), a pesar de ser un país rico en biodiversidad, en grandes extensiones de cobertura vegetal, y tener recursos de interés ambiental, las políticas ambientales, así como los organismos de control y regulación de prácticas ambientales no siempre han sido de las más acertadas, no obstante en la actualidad existe una gran tendencia de cambiar esa imagen a través de una voluntad política fuerte, es así como el Ministerio del Ambiente ha desarrollado un nuevo modelo de Gobernanza forestal, donde uno de sus objetivos es la reducción de la deforestación y así dar cumplimiento a una de las metas del Plan Nacional de Desarrollo 2009 - 2013 de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES - 2009). Dentro de los

objetivos en 2008 se generó el primer mapa de carbono forestal, fusionando coberturas extraídas de la clasificación desarrollada por Sierra (1999) con cuatro clases generales de cobertura para las que existen estimaciones medias del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) del carbono en la biomasa aérea. Posteriormente se actualiza el mapa (2011), basándose en una estratificación actualizada de la vegetación, y en estimaciones de biomasa aérea compiladas a partir de fuentes nacionales, incluyendo el carbono subterráneo y carbono aéreo (Bertzky et al., 2011).

2.3. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL.-

Se han hecho estimaciones de densidad de biomasa para muchos de los bosques del mundo. Por ejemplo, bajo el Programa Biológico Internacional (IBP), donde se realizaron estimaciones de la densidad de biomasa para muchos sitios que cubren la mayor parte de las principales regiones forestales del mundo (Reichle, 1981). Se realizaron estudios de densidad de biomasa en los bosques tropicales, (Brown & Lugo, 1982). Posteriormente se generó un mapa global de densidad de biomasa para todos los tipos de ecosistemas, incluyendo bosques intervenidos y no intervenidos, a una escala de resolución de 0.50 x 0.50 (Olson, Watts, & Allison, 1983).

Sin embargo los estudios de densidad de biomasa, o relacionados a estos, se han basado en estudios ecológicos, lo que implica varias dificultades para el análisis a nivel global, ya que están diseñados para caracterizar la estructura local de un bosque, y usualmente no representan una población de interés (Brown et al., 1989; Brown & Lugo, 1992), esto con los problemas de muestreo para escalas nacionales o globales, conlleva a determinar que los estudios de biomasa, a través de métodos locales, mediante estudios “ecológicos” deben ser utilizados con precaución ya que pueden no representar la densidad de la biomasa de los bosques en grandes áreas (Brown, 1997). La FAO, mediante el Sistema de Información de Recursos Forestales (FORIS), ha realizado estimaciones de densidad de biomasa desde 1993, partiendo de estimaciones de volumen sobre corteza “volume over bark” (VOB), que toma en cuenta árboles con diámetros a altura de pecho (DAP) de al menos 10 cm., estas muestras se toman a menudo de los inventarios forestales existentes, no obstante suelen existir pocos inventarios forestales a nivel nacional, limitando una apreciable fiabilidad en los resultados a escala global, de seguro los nuevos esfuerzos para estimar la densidad de biomasa de manera más directa sobre los inventarios forestales proporcionarán datos más fiables para evaluaciones globales de recursos forestales, así como de las características que estos conllevan (Brown, 1997).

A medida que el cambio climático ha tomado mayor interés y ha provocado cierta consciencia en la comunidad mundial, en los últimos años, los gobiernos a nivel mundial recurren a los bosques como un medio de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂, gracias a la fijación de este gas durante los procesos de fotosíntesis (Brown, 1997). Las estimaciones de la densidad de biomasa proporcionan los medios para calcular la cantidad de dióxido de carbono que se puede retirar de la



atmósfera, ya sea por plantaciones o regeneración de bosques, estableciendo las tasas de producción y los límites máximos de captura de carbono, de tal manera que se han diversificado los métodos de estimaciones de biomasa.

Tradicionalmente, la dendrometría, que es el estudio de la medida de las dimensiones del árbol como “sujeto individual”, analizando su forma y determinación de volumen, que es parte de la dasometría (i.e. disciplina que se ocupa de cuantificar el crecimiento y la producción forestal) y que esta a su vez es parte de la dasonomía (i.e. ciencia encargada del estudio de la conservación, cultivo y aprovechamiento de los montes/bosques), se ha dedicado a la medición de fustes maderables y leñas, sin embargo el estudio de ecosistemas, el cambio climático, la búsqueda de nuevos usos de materias primas así como una mayor demanda de productos obtenidos de los bosque han propiciado el estudio de la biomasa en otras fracciones del árbol. La estimación de la biomasa es importante para conocer la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los sistemas forestales. Además como se ha indicado anteriormente ha cobrado una especial importancia por ser la principal herramienta para la determinación de la fijación de carbono en la vegetación ya sea para conservación o para la utilización como combustible en la producción de energía.

Se han presentado diferentes enfoques al momento de describir una metodología para la estimación de la biomasa, primeramente basados en la medición de campo, seguidos por métodos que utilizan la teledetección, y finalizando con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en la Tabla 2.1 se resume las principales técnicas. Es así como se puede observar que los métodos convencionales basados en la medición de campo son las formas más precisas para la determinación de la biomasa. Los Métodos basados en la utilización de SIG utilizan datos auxiliares, siendo un método que depende de la calidad de los datos auxiliares. Por lo tanto, los enfoques basados en los SIG no han sido aplicados extensivamente para la estimación de biomasa. Sobre estos presentan ventajas los datos obtenidos por teledetección, permitiendo un rápido procesamiento de grandes cantidades de datos, y altas correlaciones entre las bandas espectrales y los parámetros de la vegetación (Lu, 2006).

En este proyecto se discrimina la estimación de la biomasa con fines de conservación a través de la fijación de carbono, de tal manera, que las metodologías de estimación de biomasa se clasifican únicamente en función de técnicas basadas en mediciones de campo, o de uso común, ya sea, mediante ecuaciones alométricas, o a través de la estimación del volumen sobre la corteza (VOB) de inventarios forestales conocidos, o por factores de expansión, también se clasifica de acuerdo a metodologías compuestas basadas en la teledetección, siendo estas, aquellas que se basan a través del uso de herramientas tecnológicas, como el uso de sensores remotos, mediante imágenes multiespectrales, hiperespectrales, radar o LiDAR, técnicas apreciables en la actualidad para la estimación de la biomasa a escala regional, nacional, o global, gracias al amplio rango de cobertura de estos sensores y al ahorro de recursos. A continuación se describen algunos métodos de interés de acuerdo a la clasificación mencionada (Véase

Tabla 2.1), con la finalidad de aportar un conocimiento de las técnicas utilizadas por diversos autores, y definir propiamente la metodología que se utiliza en el presente estudio.

Tabla 2.1 Resumen de las técnicas para la estimación de biomasa (tomado de: Lu, 2006)

CATEGORÍA	MÉTODOS	DATOS	CARACTERÍSTICAS
Método basado en mediciones de campo	Muestreo destructivo	Muestreo de árboles	Árboles individuales
	Ecuaciones Alométricas	Muestreo de árboles	Árboles individuales
	Conversión de volumen en Biomasa	Volumen de muestreo de árboles o de tablas estándares	Árboles individuales, Estándares de vegetación
Método basado en Sensores Remotos	Método basado en alta resolución espacial	Fotografía Aérea, IKONOS	Por nivel de píxel
	Método basado en media resolución espacial	Landsat TM/ETM+, SPOT	Por nivel de píxel
	Método basado en gruesa resolución espacial	IRS-1C WiFS, AVHRR	Por nivel de píxel
	Método basado en datos Radar	Radar, LiDAR	Por nivel de píxel
Método basado en Sistemas de Información Geográfica	Basado en datos auxiliares	Elevación, pendiente, precipitación, Tipo de suelo, Etc.	Por nivel de píxel o nivel de campo

2.3.1. Métodos tradicionales para la estimación de biomasa.-

Para estimar la biomasa existen diversos métodos, por ejemplo, el método del árbol medio, el de corta, el del análisis dimensional y alométrico o el método múltiple de muestreo (Parde, 1980), no obstante la medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere un análisis destructivo directo (Brown et al., 1989), que incluye unos ciertos pasos como: cosechar el árbol, cortar el árbol (incluidas las hojas, ramas y tallo) en pedazos pequeños más manejables, secar estos pedazos en un horno y por último ser pesados, es el método más preciso, sin embargo consume mucho tiempo, es caro y sobre todo destructivo, como consecuencia de esto, las estimaciones de biomasa a nivel regional, nacional o mundial no deberían basarse en pocas parcelas de medición directa porque las muestras a esta escala no son representativas (Brown et al., 1989), debido a esto, no es un método práctico para obtener estimaciones de biomasa en extensiones completas de bosque, por lo que se realizan estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias respectivas (Acosta Mireles et al., 2002), de acuerdo a esto el caso más práctico es realizar estimaciones indirectas, para ello, se debe contar con funciones matemáticas basadas



en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (Huxley, Strauss, & Churchill, 1932), a fin de estimar la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones de los árboles de un determinado bosque (Acosta Mireles et al., 2002). En estas situaciones Brown propone utilizar la información de inventarios forestales, logrando la suficiente cobertura de superficie para representar la población de interés. A partir de datos de inventarios forestales, se tienen dos diferentes métodos de cálculo de estimación de biomasa: el primero basado en ecuaciones matemáticas y el segundo en factores de expansión (Terán, Dauber, & Guzmán, 1992).

2.3.1.1. Ecuaciones alométricas.-

Este método consiste en un modelo destructivo de varias muestras de árboles, con la finalidad de relacionar ciertas variables sencillas de medir con el contenido de biomasa, para ello se utiliza métodos de regresión. Esta técnica también se conoce como análisis dimensional o alometría, que consiste en el estudio del cambio de proporción de varias partes del organismo como resultado propio del crecimiento de la especie (Díaz Franco et al., 2007).

El concepto de alometría se utiliza para relacionar variables de difícil obtención (biomasa o área foliar), con componentes de medición simple [área basar, diámetro a altura de pecho (DAP), altura total, área de albura, diámetro normal al cuadrado, el producto entre el diámetro normal al cuadrado y la altura, la edad y la altura de la copa viva (Parresol, 1999)], generalmente el componente más utilizado en las mediciones es el DAP, de tal manera, que se puede relacionar este componente con las variables de difícil obtención. Mientras más componentes se puedan obtener mediante mediciones simples, las estimaciones de biomasa mejoran, sin embargo, no todos los componentes se pueden obtener con total facilidad, por ejemplo, la altura, la misma que conlleva mucho tiempo y en muchos bosques, debido a su estructura cerrada, impide la identificación de la punta del árbol, así también algunos investigadores han descubierto que a efectos de calcular el volumen de un árbol es mejor utilizar alturas relativas en lugar de alturas absolutas. Esto es, por ejemplo calcular los diámetros a un 5% de la altura total, lo que dará una altura de medición de diámetro distinta para cada árbol, implicando mayores esfuerzos en la adquisición de estas mediciones.

Para la determinación de la biomasa, mediante este método, se debe medir primeramente el DAP de cada muestra, lo que permite la comparación de las medidas tomadas sobre distintos árboles en distintos momentos, esta medida es una convención universal, en la que se mide el diámetro con corteza (a menos que se determine lo contrario), a una altura fija desde el nivel del suelo, esta medida estándar es la altura del pecho, la misma que puede variar ligeramente entre algunos países (En la Europa continental, Australia, Reino Unido, Canadá, entre otros se considera la altura del pecho definida como 1,30 m de altura desde el suelo; En Nueva Zelanda, India, Malasia, Sudáfrica y algunos otros países la altura del pecho se considera como 1,40 m desde el suelo; En Estados Unidos se usa 4,5 pies “1,3716 m”; y en Japón 1,25 m), posterior

al registro del DAP, se procede a derribar el árbol, seccionando en trozas comerciales, desde las más grandes posibles hasta las más pequeñas, obteniendo rodajas de cada una de estas trozas, se separa las ramas del follaje (Véase Figura 2.9), y se pesan independientemente, se obtienen de una a cuatro muestras de ramas y follaje de acuerdo al tamaño del árbol (Díaz Franco et al., 2007), cada componente fresco debe ser pesado en básculas apropiadas, la obtención del peso seco se realiza después del apropiado secado de las muestras mediante estufas, micro túneles, siendo este un proceso que se realiza en laboratorio.

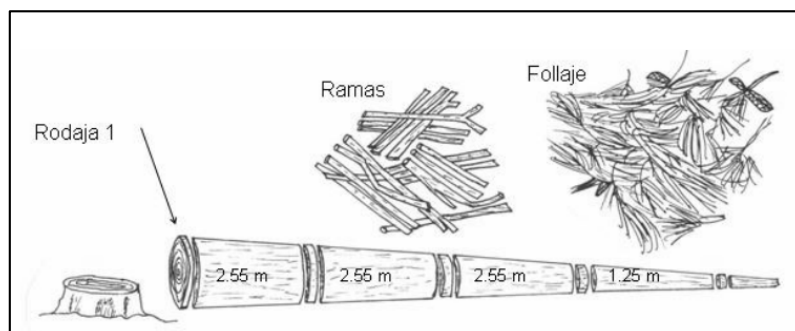


Figura 2.9 Troceo del arbolado, obtención de rodajas, muestras de ramas y follaje (fuente: Díaz Franco et al., 2007)

Una vez conocidos los pesos de los distintos componentes es necesario ajustar un modelo matemático que relacione los pesos de biomasa seca con una o más variables representativas de estos árboles (Montero et al., 2005). En la actualidad existe una gran variedad de modelos para estimar la biomasa de un árbol o de cada uno de los componentes analizados, sin embargo todas las ecuaciones proceden de alguna de las siguientes funciones matemáticas (Montero et al., 2005), [2] Función Lineal; [3] Función No lineal; [4] Función Logarítmica.

$$b = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_j \cdot x_j \quad [2]$$

$$b = b_1 \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot \dots \cdot x_j^{b_j} \quad [3]$$

$$\log b = b_0 + b_1 \cdot \log x_1 + b_2 \cdot \log x_2 + \dots + b_j \cdot \log x_j \quad [4]$$

Dónde:

- b = biomasa seca total o de alguno de los componentes del árbol;
- x_j = componentes de medición simple;
- b_j = parámetros del modelo.

Entre las ecuaciones más utilizadas para la estimación de biomasa se halla la ecuación alométrica (Díaz Franco et al., 2007; Montero et al., 2005), que relaciona la biomasa seca total de alguno de los componentes del árbol con el diámetro normal, esta ecuación [5] tiene la siguiente forma:

$$y = \alpha \cdot d^\beta \quad [5]$$



Donde:

- y = Biomasa seca total, o de alguno de los componentes del árbol expresada en kg.
- α, β = parámetros estimados en función del modelo (especie analizada).
- d = DAP o diámetro normal.

La ecuación [5] no es lineal, por lo que su expresión logarítmica sería [6]:

$$\ln y = \ln \alpha + \beta \cdot \ln d \quad [6]$$

El porcentaje de biomasa seca mediante este método destructivo se estima en laboratorio, a partir de esta cuantificación se calcula la cantidad de CO₂ que almacena el árbol, se estima que aproximadamente el 50% de carbono está contenido en todas las maderas (Kollman, 1959), sin embargo al tener datos específicos, el cálculo para la fijación de carbono se realiza mediante la proporción entre el peso de la molécula de CO₂ y el peso del átomo de C que la compone. Se halla la relación que se utilizará para obtener los kg de CO₂ equivalente a partir de la cantidad de carbono presente en la biomasa ($44/12 = 3,67$). De tal manera que la fijación de carbono se obtiene multiplicando los valores modulares de biomasa por el contenido en carbono y por la relación molécula de CO₂ peso átomo C (3,67) obteniendo los valores modulares de CO₂ acumulado, por clases diamétricas y fracciones de biomasa para cada especie que se analice (Montero et al., 2005).

2.3.1.2. Factores de expansión de biomasa (BEF).-

Este método se aplica cuando no existe la información detallada de un inventario forestal con los parámetros de cada árbol individual. Consiste en multiplicar la biomasa de los fustes (i.e. madera del árbol sin considerar la corteza), por el factor de expansión de biomasa dando como resultado el valor de biomasa aérea total. La biomasa de los fustes es el producto del volumen del fuste (volumen comercial) por la densidad básica promedio de las especies. Los factores de expansión pueden reemplazar los datos de campo de los inventarios forestales requeridos para estimaciones de biomasa. Necesariamente requieren valores de densidad básica de la madera para transformar el volumen de fuste a valor de biomasa (Terán et al., 1992).

Por ejemplo para especies de bosques de hoja ancha, el factor de expansión de biomasa se define como: la relación entre la densidad de biomasa sobre el suelo, del total de árboles con un DAP mínimo de 10 cm, más la densidad de biomasa del volumen inventariado, estos dos procesos de obtención de biomasa se los obtiene después de un respectivo secado de las muestras mediante el uso de un horno en laboratorio. Estas relaciones se calculan a partir de inventarios forestales de una gran cantidad de tipos de bosques que tienen la característica especial de tener una hoja ancha (hoja joven por madurar), estos bosques particularmente habitan en climas húmedos a secos, principalmente en los trópicos (Brown et al., 1989). El análisis de estos datos muestra que los factores de expansión de biomasa están significativamente

relacionados con la biomasa correspondiente del volumen inventariado de acuerdo con la siguiente ecuación [7] (Brown & Lugo, 1992; Brown, 1997).

$$BEF = e^{\{3.213 - 0.506 \cdot \ln(BV)\}} \quad [7]$$

Dónde:

Para valores de $BV < 190$ t/ha, y para valores de $BV \geq 190$ t/ha., $BEF = 1.74$.

El tamaño de la muestra = 56, ajustado a coeficientes de determinación $r^2 = 0,76$ (Brown, 1997).

2.3.2. Métodos avanzados de estimación de biomasa.-

Como se ha indicado anteriormente, a escala regional o local, la estimación de biomasa se realiza usualmente mediante la información de inventarios forestales, mediante el conocimiento preciso de datos de volumen y crecimiento, sin embargo este trabajo requiere mucho tiempo, debido a los procesos que se deben realizar en campo, sean estos por el difícil acceso a las zonas de estudio o a la cantidad de recursos que se ven involucrados en la obtención de la información.

Con el surgimiento de la teledetección, y con el avance de los diversos sensores, sean estos, ópticos (sensores pasivos), y de tecnología radar o LiDAR (sensores activos), la estimación de biomasa, y otros parámetros biofísicos, han resultado de gran interés, principalmente a escala global, debido a la reducción de costos, tiempo y recursos, brindando resultados de gran precisión.

La información procedente de la teledetección está disponible a diferentes escalas y longitudes de onda, si bien la mayoría de los estudios realizados han demostrado que el óptico e infrarrojo medio no funcionan correctamente con densidades terrestres, en el caso del radar, han sido encontradas, a través de un buen número de investigaciones, relaciones positivas entre dicha radiación y ciertas características forestales (Beaudoin et al., 1994). En la Tabla 2.2, se presentan algunas características entre los sensores activos y pasivos, desde el punto de vista de su utilidad sobre la vegetación terrestre, y se presentan algunos ejemplos de sensores.



Tabla 2.2 Tipos de sensores y sus aplicaciones en el estudio de la vegetación terrestre (tomado de: Castillo Santiago, 2009)

	SENSORES PASIVOS				SENSORES ACTIVOS	
CARACTERISTICA DEL SENSOR	Multiespectral de resolución gruesa	Multiespectral de alta resolución	Hiper-espacial	Hiper-espectral	LiDAR	Radar
RESOLUCION ESPACIAL	250 m - 8 Km	10 -50 m	< 5 m	4 - 20 m	Muy alta	Global
COBERTURA ESPACIAL	Global	Limitada antes de 1990; Global desde 1990	Muy Limitada	Muy Limitada	Muy Limitada	Global
RESOLUCION TEMPORAL	Diario desde principios de los años 80	16 días desde los años 70	Ciclo de repetición no regular	Ciclo de repetición no regular	Ciclo de repetición no regular	Varias veces al año
RESOLUCION ESPECTRAL	< 10 bandas, cubre la región visible al IR térmico	< 10 bandas, cubre la región visible al IR térmico	< 5 bandas, cubre la región visible al IR	> 200 bandas, cubre la región visible al IR	-----	-----
EJEMPLO DE SENSOR	AVHRR, MODIS, SPOT Vegetation	Landsat ETM+, SPOT HRV, CBERS, ASTER, LISS	Quickbird, Ikonos	AVIRIS, Hyperion	LVIS	PALSAR, ALSAR, GLAS
EJEMPLO DE APLICACION	Mapeo de vegetación global/continental; productividad de la vegetación en el largo plazo; fuegos activos y huellas de quema	Cambio de la cobertura del suelo; mapeo de hábitat; crecimiento urbano	Validación y calibración de la resolución espacial gruesa; mapeo de copas de árboles; patrones urbanos	Contenido de agua y nitrógeno en hojas; especies invasoras; materiales de construcción	Estructura del dosel; hábitats	Estructura del dosel; hábitats

2.3.2.1. Estimación de biomasa mediante sensores pasivos.-

El procesamiento de imágenes satelitales pueden proporcionar estimaciones de parámetros biofísicos de los bosques, entre ellos el índice foliar, la biomasa, la fijación de carbono, entre otros, parámetros que tienen una relación directa con algunas funciones de los ecosistemas (Castillo Santiago, 2009).

Entre los sensores pasivos tenemos imágenes de tipo hiper-espectral e hiper-espacial, las mismas que pueden proporcionar mediciones ecológicas de manera directa, estudios recientes han logrado determinar la calidad de los nutrientes del dosel, el contenido de humedad, el índice foliar, a partir de cálculos derivados de estimaciones de campo. Con el uso de imágenes multiespectrales de resolución gruesa, mediante observaciones diarias, se puede determinar patrones fenológicos, o tasas de deforestación, permitiendo una integración más profunda de los datos de campo, de los análisis de teledetección y de modelos de simulación a fin de proporcionar una visión más integral de los procesos de los ecosistemas a escala regional y mundial (Chambers et al., 2007).

La mayoría de estudios realizados de estimación de biomasa a partir de imágenes satelitales con sensores pasivos, utilizan únicamente la información espectral de las imágenes, concluyendo que la región del espectro electromagnético, que tiene una relación estrecha con dicha estimación, es el infrarrojo medio (Castillo Santiago, 2009; Ingram, Dawson, & Whittaker, 2005; Roy & Ravan, 1996; Steininger, 2000).

No obstante, a parte de la utilización de la respuesta o firma espectral, se utiliza una serie de índices espectrales de vegetación, los mismos que sirven para estimar biomasa, estos índices, no son nada más que una combinación algebraica de determinadas bandas, donde la radiación electromagnética influye en la captación y emisión de la radiación producida por la vegetación. Todas las plantas verdes absorben la radiación electromagnética visible (0.5 a $0.65 \mu\text{m}$), y reflejan intensamente la radiación del infrarrojo cercano (0.8 a $1.25 \mu\text{m}$) (Castillo Santiago, 2009). Los índices espectrales de vegetación se han desarrollado con el objeto de enfatizar estas diferencias, mediante operaciones matemáticas que usualmente implican la diferencia o el cociente de dos bandas de una imagen multispectral (Verstraete & Pinty, 1996).

Entre los índices de vegetación más antiguos, se tiene el denominado Simple Ratio (SR), el mismo que se desarrolló con la finalidad de estimar el índice de área foliar para bosques tropicales (C. F. Jordan, 1969), uno de los índices más reconocidos por su utilidad y fácil obtención es el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), propuesto en sus inicios como un estimador de la biomasa fotosintéticamente activa del dosel (Tucker, 1979). Los efectos del suelo son atenuados con la utilización de índice Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), que fue desarrollado para minimizar la influencia del brillo del suelo (Rondeaux, Steven, & Baret, 1996). Otro índice a considerar es aquel con el que disminuyen o “eliminan” los efectos atmosféricos no deseados, esto se pretende con la utilización del índice Global Environment Monitoring Index (GEMI) (Verstraete & Pinty, 1996).

Los índices espectrales de vegetación demuestran ser una herramienta de gran importancia al momento de estimar algunas variables biofísicas del bosque, sin embargo presentan ciertos inconvenientes, ya que se obtienen relaciones no lineales, y la relación entre la variable de interés y el índice de vegetación se vuelve asintótica a bajos niveles de área foliar, por lo que limita su aplicación a determinados bosques, donde el contenido de biomasa es bajo (v.g. bosques secundarios) (Castillo Santiago, 2009). El uso de imágenes hiper-espectrales o hiper-espaciales, captando regiones espectrales más angostas o con mejor definición espacial, evitando la saturación con los índices de vegetación presentando resultados prometedores, en los diferentes estudios revisados.

La estimación de biomasa aérea, objetivo de este proyecto, puede estimarse, como se ha indicado utilizando datos de teledetección, a través de la relación de los índices de vegetación, sin embargo también existen diferentes enfoques, como el análisis de regresión múltiple, k-vecino más cercano, o la utilización de redes neuronales (Foody, Boyd, & Cutler, 2003; Nelson, Kimes, Salas, & Routhier, 2000; Roy & Ravan,



1996; Steininger, 2000; D. Zheng et al., 2004), también existe otros métodos que se obtiene de manera indirecta, es decir derivando de información previamente obtenida mediante teledetección, como ciertos parámetros de cobertura, tales como el diámetro de la copa, que a través de modelos de regresión múltiple o diferente reflectancia del dosel, se puede estimar las variables biofísicas a considerar (Phua & Saito, 2003; Popescu, Wynne, & Nelson, 2003; Woodcock et al., 1997; Wu & Strahler, 1994).

A continuación se presenta un modelo de estimación de biomasa mediante el uso de los índices de vegetación desarrollado por Castillo Santiago (2009), sin embargo en el trabajo realizado por Lu (2006), se puede encontrar un resumen, donde se mencionan varias técnicas aplicadas sobre imágenes satelitales a diferentes resoluciones espaciales.

Modelo para estimar biomasa con el uso de sensores pasivos (Castillo Santiago, 2009).-

Mediante el uso de imágenes SPOT-5 HRV multiespectrales de resolución espacial de 10 m, se realizó este modelo de estimación, iniciando con un proceso de corrección atmosférica basado en el método Dark Object Subtraction (DOS) (Chavez, 1996). Se utiliza herramientas SIG, donde se genera un buffer de 25 m de radio en el centroide de cada parcela muestreada, con la finalidad de extraer el valor espectral de cada píxel dentro de esta área definida. A partir de las bandas espectrales corregidas por efectos atmosféricos, se derivan índices de vegetación espectral (SR, NDVI, SAVI y GEMI), se debe seleccionar los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2), los mismos que permiten sintetizar las bandas originales en nuevas bandas recogiendo la parte más relevante de la información original (Rojas Unda, 2011) y siete estimadores de textura de primer y de segundo orden que se refiere a los patrones de variación de los valores de brillantez dentro de una imagen. Se debe realizar un análisis de correlación lineal para seleccionar el subconjunto de variables que mejor se relacionen con la biomasa. Posteriormente se realiza un análisis de regresión lineal para seleccionar las variables que estiman a la biomasa de las parcelas con el mínimo error. El método consiste en eliminar una observación del conjunto de datos, ajustando el modelo con las observaciones restantes, a partir del cual se calcula la diferencia entre los valores estimados y observados, repitiendo para todas las observaciones realizadas. Finalmente se calcula el error medio cuadrático a partir de las diferencias obtenidas.

Estimación de la biomasa foliar mediante la Teoría de la Fracción de huecos.-

Durante las últimas décadas, las definiciones del índice de área foliar (LAI) por sus siglas en inglés, han sido proporcionadas por los científicos de muchas disciplinas para una serie de propósitos, tales como la determinación de sucesión de la comunidad forestal, o los regímenes de radiación solar dentro de dosel de las plantas. En la Tabla 2.3 se describe un resumen de las diferentes definiciones de índice de área foliar. Entre las definiciones de LAI se tiene el índice de área foliar total (T_oLAI), que define el área unilateral total del tejido fotosintético por unidad de área de la superficie del suelo, esta definición es especialmente aplicable bajo la condición de tener una hoja plana con una misma área en ambos lados, sin

embargo las hojas tienen diversas formas, por lo tanto, se introdujo otro concepto que es el LAI Proyectado (PLAI), siendo este la determinación del área de sombra sobre el plano que se cuela por debajo de una hoja horizontal al ser expuesta a una luz con una distancia infinita sobre la hoja. Se tiene también, el concepto de índice de área de silueta foliar (SLAI), la misma que define el área de las hojas inclinadas a la superficie horizontal. El índice de área foliar efectivo (ELAI) es una media de la superficie total de luz interceptado por las hojas, basado en la suposición de que todos los elementos del follaje se encuentren distribuidos aleatoriamente en el espacio, este concepto se introdujo para describir con precisión la radiación de onda larga y corta. No obstante existe una definición ampliamente aceptada, el índice verdadero de área foliar (TLAI), el que se define como la mitad de la superficie total de la hoja verde por unidad de superficie del plano del terreno, este analiza matemáticamente el coeficiente medio de proyección para diversos objetos geométricos que representa las diferentes formas de las hojas reales (G. Zheng & Moskal, 2009).

La definición más popular de LAI, es la que representa la proyección sobre el plano del suelo del área foliar, el área del conjunto de las hojas por unidad de suelo, considerándose la superficie de una cara en el caso de hojas planifolias. El LAI representa la principal superficie de intercambio entre la copa y la atmósfera, siendo su valor la propiedad estructural de la copa que determina la interceptación de la radiación. Una estimación precisa del LAI es fundamental para comprender el funcionamiento de los procesos de los ecosistemas, incluyendo la interceptación de lluvia y CO₂ y los flujos de vapor de agua, así como la cuantificación de la productividad de los ecosistemas (Calvo Polanco et al., 2005). Se calcula mediante la suma de la proyección vertical del área del follaje en un plano horizontal desde el suelo ($z=0$) al principio de la copa ($z=h$), depende del coeficiente promedio de densidad de superficie del follaje (u) expresada en m^2/m^2 , siendo un valor adimensional, se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación [8]:

$$L(z) = \int_{z=0}^{z=h} u(z) dz \quad [8]$$



Tabla 2.3 Comparación de definiciones de LAI (tomado de: G. Zheng & Moskal, 2009)

TIPO	DEFINICIÓN	APLICACIÓN
Índice de área foliar total (ToLAI)	Área total de un solo lado del tejido fotosintético por unidad de área de la superficie del terreno	Aplicable a hojas anchas
Índice de área foliar proyectado (PLAI)	Área de sombra sobre el plano que se cuele por debajo de una hoja horizontal al ser expuesta a una luz con una distancia infinita sobre la hoja	La superficie máxima de las hojas varía dependiendo del ángulo cenital de sensor
Índice de área de silueta foliar (SLAI)	Área de las hojas inclinadas a la superficie horizontal	Investiga la intercepción de radiación para diferentes formas de las hojas
Índice de área foliar efectivo (ELAI)	Área de la superficie total de luz interceptado por las hojas	Describe precisamente el régimen de intercepción de radiación y la radiación dentro y bajo el dosel
Índice de área foliar verdadero (TLAI)	Se define como la mitad de la superficie total de la hoja verde por unidad de superficie del plano del terreno	Caracteriza cuantitativamente el régimen de radiación dentro y bajo el dosel, y simula el proceso ecológico

Entre los métodos para determinar el LAI, una forma popular es medir la penetración de la luz y determinar la cantidad y distribución de las aberturas en el dosel, que se refieren a menudo como fracción de huecos o “Gap fraction”, esta describe la posibilidad de que los rayos de luz del sol no penetren en el sotobosque (es el área de un bosque que crece más cerca del suelo por debajo del dosel vegetal) a través del dosel.

La teoría de la fracción de Huecos o “Gap fraction” es el porcentaje de huecos en el dosel del árbol que se presentan al tener un ángulo cenital solar determinado, generalmente es obtenido a partir de la transmitancia de la radiación, y la posición espacial de cada hoja, en realidad, se determina por su distribución espacial y angular tal como se muestra en la Figura 2.10.

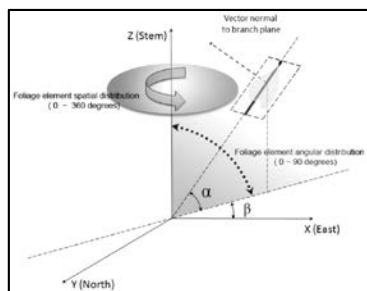


Figura 2.10 Diagrama esquemático que ilustra la distribución espacial y angular para una sola hoja (β es el ángulo azimutal para esta hoja individuales que van de 0 a 360 grados, y α es el ángulo de inclinación de esta sola hoja, cuyo rango es de 0 a 90 grados) (fuente: G. Zheng & Moskal, 2009)

La medición de la fracción gap es una forma aceptable para analizar la estructura de la copa de los árboles y, a menudo parametrizada con el LAI y la distribución angular de las hojas. Representada por $P(\theta)$, que indica la fracción de hueco para el ángulo cenital θ que simboliza de la luz incidente del sol, se puede expresar matemáticamente con el modelo de Poisson [9]:

$$P(\theta) = e^{[-G(\theta) \times L / \cos(\theta)]} \quad [9]$$

Dónde $G(\theta)$ es el coeficiente de proyección del follaje sobre un plano (normal) perpendicular a la radiación entrante, y L es la LAI de la cubierta forestal incluyendo todos los componentes estructurales de superficie (ramas, troncos, conos, y epífitas).

Debido a la estructura del dosel del bosque, se forman muchos huecos dentro de la cubierta y permiten que los rayos solares penetren a través de esta y proporcionen suficiente luz para el crecimiento del sotobosque, de tal manera que en la teoría de la fracción de huecos no se considera la superposición y la aglutinación de las hojas en el dosel, desestimando el LAI verdadero (TLAI), pero si se estima el LAI efectivo (ELAI), bajo el supuesto de una distribución aleatoria del follaje, por lo tanto la definición del LAI efectivo queda expresada en la siguiente ecuación [10]:

$$L_e = 2 \int_0^{\pi/2} \ln \left[\frac{1}{P(\theta)} \right] \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad [10]$$

Dónde $P(\theta)$ es la medida de fracción de huecos del dosel con ángulo cenital θ y L_e es la LAI efectivo (G. Zheng & Moskal, 2009).

Basados en la medición sin contacto y en la teoría de la transmisión de radiación, la fracción de huecos puede ser estimada a través de un conjunto de instrumentos ópticos que han sido desarrollados por diferentes casas comerciales, que sirven para estimar el ELAI, entre estos tenemos: Plant Canopy Analyzer



(PCA) (LI-COR, Lincoln, NE), DEMON (CISRO, Centro de Mecánica del Medio Ambiente, Canberra, Australia), AccuPAR Ceptometer (Decagon Device, Pullman, WA) y cámaras digitales con lente de gran angular, mejor conocidos como lentes de ojo de pez, que proporcionan imágenes hemisféricas. Otros instrumentos caracterizan la aglutinación y el efecto de solapamiento en la copa de los árboles entre aquellos se tiene el instrumento TRAC desarrollado por (3rd Wave Engineering, Ontario, Canada) (G. Zheng & Moskal, 2009). Los valores obtenidos por métodos indirectos o sin contacto corresponden al índice de área de planta (PAI) que engloba el conjunto de componentes aéreos de la planta, y se puede descomponer en dos fracciones, el LAI y el índice de área no foliar (NLAI), de forma que $PAI = LAI + NLAI$; se estima que los valores de PAI obtenidos son similares a los de LAI obtenidos por métodos directos, aunque de acuerdo a otros autores se indica que si se omite la lectura del anillo externo (68° de ángulo cenital), se obtiene una estima un 11% menor que el valor medido por el método directo (Calvo Polanco et al., 2005).

A continuación se describe dos metodologías para estimación de LAI efectivo, técnicas que son aplicadas en el desarrollo de este proyecto, siendo la metodología basada en instrumentos TRAC que es un acrónimo de (Tracing Radiation and Architecture of Canopies) y la estimación mediante imágenes hemisféricas obtenidas a través de cámaras con lente de gran angular u ojo de pez.

Fotografía hemisférica Digital “DHP”.-

La fotografía hemisférica es utilizada en climatología y ciencias forestales permitiendo obtener un registro detallado de los claros del dosel y estimar, tanto la estructura del mismo, como la transmisión de luz al sotobosque, ambas variables de gran importancia para el inventario forestal y el manejo de la regeneración natural. Los equipos de fotografía hemisférica tienen usos muy diversos, incluso en fotografía artística, su costo es bajo en comparación con instrumentos específicos (Díaz, Lencinas, & del Valle, 2014).

“Los lentes con distancia focal del orden de los 10 mm (extremadamente corta) y campo visual cercano a los 180° se conocen como lentes ojo de pez o hemisféricos. Desde principios del siglo XX comenzaron a utilizarse en ciencia y técnica, actualmente son empleados en climatología y ciencias forestales, muchas veces en vinculación con teledetección satelital y sistemas de información geográfica. Con fotografías hemisféricas tomadas desde el interior del bosque pueden medirse los claros del dosel (fracción, tamaño y distribución). A partir de esas mediciones es posible estimar estructura y transmisión de luz al sotobosque, ambas de gran importancia para el inventario forestal y el manejo de la regeneración natural. Aunque no se trate de un instrumento específico, para utilizar esta técnica correctamente se requiere de conocimientos particulares de óptica, fotografía y procesamiento digital de imágenes” (Díaz et al., 2014).

Para fotos hemisféricas, las fracciones de huecos se calculan en base al contraste entre el cielo y el dosel. Como resultado, una exposición correcta es muy importante para la recuperación precisa de los parámetros del dosel (Zhao et al., 2012).

Captura de la fotografía.-

Es esencial que la cámara esté nivelada y en un soporte firme. Para ciertas estimaciones y correcciones es necesario orientarla hacia algún punto cardinal de referencia, como, por ejemplo, dirigir la parte superior de la foto hacia el norte, en la siguiente figura se presenta un esquema del proceso de adquisición de la imagen hemisférica.

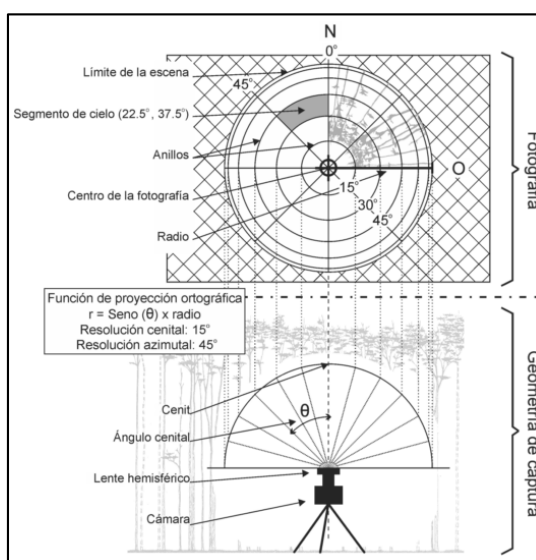


Figura 2.11 Esquema del proceso de captura de una fotografía hemisférica (fuente: Díaz et al., 2014)

Para la clasificación digital mediante un valor umbral es necesario que el registro del cielo sea muy claro y el de la vegetación muy oscuro. Sin embargo, esto tiene que ocurrir con un mínimo de sobreexposición, porque de lo contrario se produce un efecto conocido como blooming, que hace ver los claros del dosel más grandes de lo que realmente son (Véase Figura 2.12). Para obtener el máximo contraste con el mínimo blooming es necesario que el cielo brille homogéneamente, lo cual sucede en días completamente nublados y, en menor medida, en el crepúsculo. Pero no es suficiente con esperar las mejores condiciones de iluminación, todavía resta definir la exposición de la cámara, que afectará tanto al contraste como al blooming.

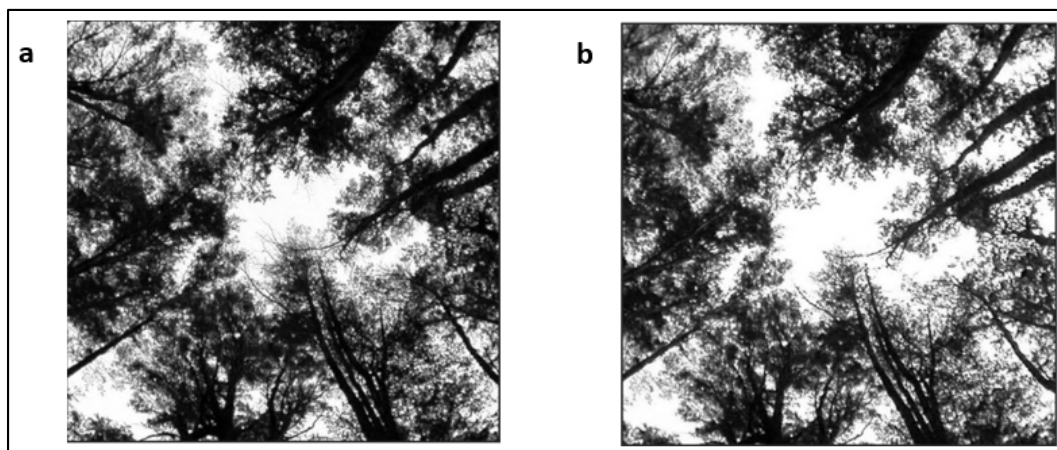


Figura 2.12 a) Imagen sin efecto blooming b) Imagen con efecto blooming (fuente: Díaz et al., 2014)

Las cámaras digitales tienen un modo automático para fijar la exposición que responde a una función interna de la cámara, la cual es regulada por un fotómetro y, por lo tanto, es dependiente del nivel de luz bajo el dosel (Díaz et al., 2014). Para fijar la exposición en forma independiente, se debe aumentar la exposición en dos pasos relativos, debido a la exposición determinada de manera automática por la cámara en un claro extenso o directamente bajo el cielo. Este proceso debe repetirse cada vez que las condiciones de iluminación cambien (Zhang, Chen, & Miller, 2005), lo que sucede muy rápidamente en el crepúsculo. Para aumentar la exposición se puede variar la apertura o la velocidad de obturación, pero debe tenerse cuidado con bajas velocidades de obturación porque producen imágenes de poca nitidez debido a las vibraciones de la cámara y el movimiento del follaje (Díaz et al., 2014) en la siguiente figura se aprecia dos ejemplos de modos de exposición.

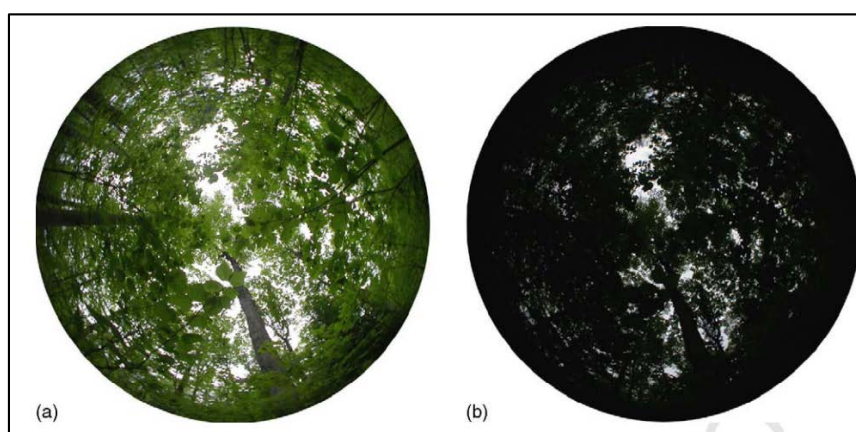


Figura 2.13 (a) fotografía hemisférica digital tomada con la exposición automática (b) fotografía digital tomada con la exposición que produce un mayor contraste (fuente: Zhang et al., 2005)

Procesamiento Digital.-

La Fotografía hemisférica en formato JPEG tienen tres bandas de 8 bits (i.e. banda rojo, banda verde, y banda azul, RGB), produciendo un rango de nivel digital de 0 a 255. En la banda azul del espectro electromagnético, los elementos del follaje tienen una reflectividad y transmitancia más baja, haciendo que el follaje en la banda azul sea más oscuro que en la banda roja o verde (Véase Figura 2.14) (Zhang et al., 2005).



Figura 2.14 Imagen en la banda azul (fuente: Díaz et al., 2014)

Clasificación Digital.-

La clasificación digital aplicada a fotografías hemisféricas es simple, adecuada para discriminar dos clases con alto contraste. El objetivo de la clasificación es separar los claros de la vegetación, por lo que cada píxel se clasifica en “cielo” y “no-cielo”. Se utiliza solamente la banda azul y se clasifica mediante valores umbrales (Véase Figura 2.15), sirve para separar una banda en dos o más clases. Este procesamiento digital se conoce como binarización porque genera archivos raster de 1-bit. Asignando el valor 0 a la vegetación (no-cielo) y 1 a los claros (cielo) (Díaz et al., 2014).

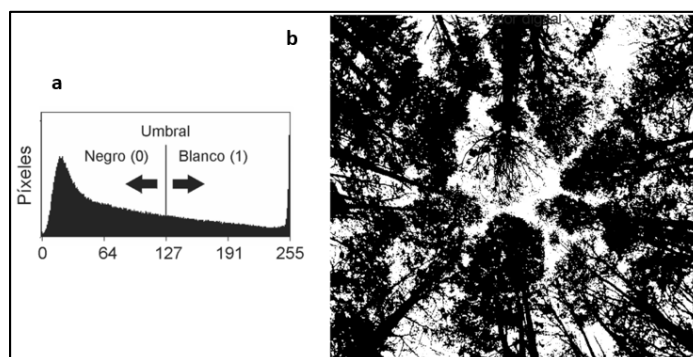


Figura 2.15 a) Umbral de disgregación b) Imagen binarizada (fuente: Díaz et al., 2014)

Estimación de parámetros estructurales del dosel

La estructura del dosel puede ser caracterizada por numerosas variables (parámetros estructurales), como la biomasa aérea total, la distribución angular de las hojas y el índice de área foliar, siendo algunas de ellas estimables con fotografía hemisférica, de la cual, se puede tener un registro detallado de la distribución espacial, tamaño y forma de los claros del dosel en función del ángulo cenital (Díaz et al., 2014). Entre los parámetros de mayor importancia que se obtiene mediante fotografía hemisférica es la fracción de huecos o “gap fraction” (GF), la misma que se define como el porcentaje de cielo que puede ser visto desde debajo del dosel arbóreo (Chen, Rich, Gower, Norman, & Plummer, 1997). Éste puede ser medido con la fotografía hemisférica bajo el supuesto de que los elementos del dosel se comportan como objetos oscuros (i.e. no transmiten luz) en la banda del azul. Se calcula con las siguientes ecuaciones [11] y [12].

$$GF(\varphi, \theta) = \frac{P_B}{P_N + P_B} \quad [11]$$

$$GF_{total} = \frac{1}{N} \sum_1^N GF(\varphi, \theta) \quad [12]$$

Donde φ es el ángulo azimutal medio y θ es el ángulo cenital medio (ambos de un segmento del hemisferio proyectado en el plano), P_N es el número de píxeles negros y P_B es el número de píxeles blancos (ambos referidos al segmento del hemisferio $[\varphi, \theta]$) y N es el número de segmentos. En teoría, cuanto mayor sea el número de segmentos mayor será la precisión de las estimaciones. Sin embargo, el LAI es proporcional a $-\ln(GF)$ y éste no tiene solución para $GF=0$, por lo tanto, la resolución angular debe ser suficientemente gruesa como para que ningún segmento de cielo quede solamente con píxeles negros (Díaz et al., 2014).

Tracing Radiation and Architecture of Canopies (TRAC).-

Es una técnica que determina el Índice de área foliar (LAI) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel de las plantas (F_{PAR}), mediante el uso de un instrumento óptico denominado TRAC que es un acrónimo para “Tracing Radiation and Architecture of Canopies”. Este equipo toma medidas a partir del dosel, como la distribución del tamaño del hueco “gap size” a de más de la fracción del hueco “gap fraction”. teoría presentada por Chen & Cihlar (1995) y modificada por Leblanc (2002), Se mide sólo el PAI, porque los instrumentos ópticos no pueden distinguir entre madera y hojas, este índice, medido por la técnica TRAC se utiliza para convertir el PAI en LAI efectivo (Leblanc, 2002), se ha demostrado que el TRAC puede medir con precisión un cambio en el PAI, cuando los árboles son talados, induciendo la formación conglomerada del dosel, Se recomienda que las medidas del TRAC

se utilicen para investigar el patrón de distribución espacial del follaje, mientras que los instrumentos de visualización hemisféricas tales como el LAI-2000 pueden ser utilizados para estudiar el patrón de distribución angular del follaje. El uso combinado de TRAC y LAI-2000 puede permitir una evaluación rápida y precisa del LAI de un dosel (Leblanc, Chen, & Kwong, 2002).

Instrumento TRAC.-

El TRAC (incluyendo los componentes de análisis y grabación de datos) puede ser transportado por una sola persona, caminando a un ritmo constante (aproximadamente 0,3 metros por segundo). Utiliza el haz de la luz solar como una sonda, registrando la luz directa transmitida a una alta frecuencia (32 Hz). Estos registros se pueden observar en la Figura 2.16, donde cada pico en la traza de tiempo, representa un hueco en el dosel, respecto a la dirección del sol. Estos valores individuales se convierten en mediciones del tamaño del hueco para posteriormente obtener la distribución del tamaño del hueco (Véase Figura 2.17), en este gráfico la línea roja simboliza la fracción de hueco acumulada, la curva de distribución del tamaño de hueco revela la composición de la fracción huecos y contiene mucha más información que las mediciones de fracción de hueco convencionales (Leblanc et al., 2002).

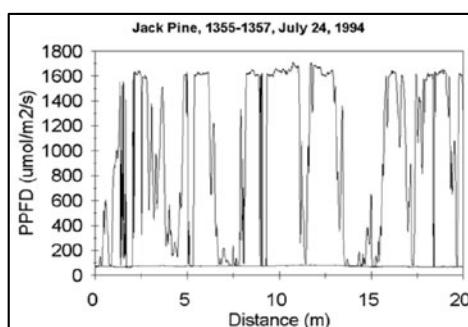


Figura 2.16 Un ejemplo de las mediciones del TRAC a lo largo de un transecto de 20 m (fuente: Leblanc et al., 2002)

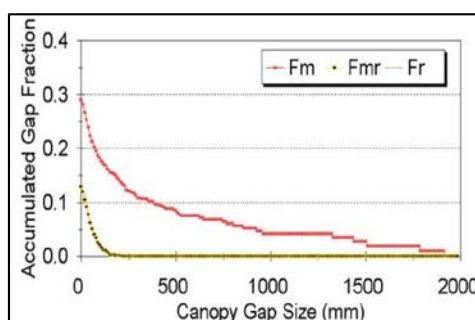


Figura 2.17 Fracción de hueco acumulada (Fm), Fracción de hueco acumulada mediante procesos de eliminación Fmr, curva de distribución de la Fracción de hueco ajustada (Fr), la diferencia entre Fm y Fmr es el índice de aglomeración y Fm determina el PAI efectivo (fuente: Leblanc et al., 2002)

El equipo TRAC consta de 3 sensores PAR (400 a 700 nm) y amplificadores, un convertidor de señal analógica a digital, un microprocesador, una memoria con respaldo de batería, un reloj y de circuitos

de entrada y salida. Un interruptor de alimentación controla la alimentación de todos los componentes del sistema, excepto la memoria. Un botón controla el funcionamiento cuando el aparato está encendido, el mismo que se usa también para insertar marcadores de distancia y tiempo (Véase Figura 2.18) (Leblanc et al., 2002).



Figura 2.18 Equipo TRAC (fuente: Leblanc et al., 2002)

Análisis de Datos obtenidos con TRAC.-

Para el análisis de datos, los huecos medidos se organizan, ya sea en orden ascendente o descendente, de acuerdo a su tamaño en función de la acumulación del tamaño del hueco $F(\lambda)$, (Véase Figura 2.19).

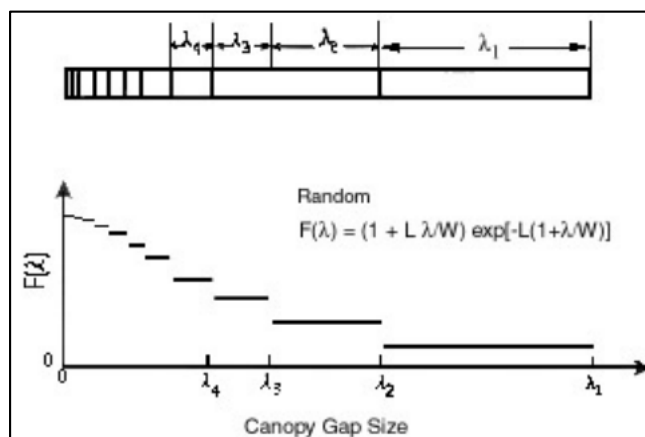


Figura 2.19 Esquema de la medida de distribución del tamaño de hueco del dosel en un transecto bajo el dosel (fuente: Leblanc et al., 2002)

Dónde $F(\lambda)$ denota la fracción del transecto ocupada por deficiencias mayores que λ , λ_1 es la única brecha (hueco) en el transecto de longitud L , $M(\lambda)$, $F(\lambda)$ aumenta a medida que λ disminuye. Para $\lambda=0$, $F(\lambda)$ se convierte en la fracción del transecto ocupado por todos los huecos, es decir, la fracción total de huecos de la cubierta (Leblanc et al., 2002).

Definición de F_{PAR} -

F_{PAR} se define como la fracción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) incidente que es absorbida por el dosel, la F_{PAR} excluye la fracción de PAR reflejada por el dosel y la fracción absorbida por la superficie subyacente incluyendo el suelo, la cobertura del suelo y sotobosque. Para obtener la F_{PAR} , se requiere considerar el PAR en dos niveles: inmediatamente por encima y por debajo del dosel (Leblanc et al., 2002). Cuando tales mediciones en un tiempo determinado se obtienen, la F_{PAR} , denotado por $F(t)$, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F(t) = \frac{(P_{d1} - P_{u1}) - (P_{d2} - P_{u2})}{P_{d1}} \quad [13]$$

Donde P_{d1} y P_{u1} son la radiación incidente y la radiación reflejada para el primer nivel (por encima del dosel), respectivamente; P_{d2} y P_{u2} son los términos correspondientes al segundo nivel (por debajo de la copa). En esta ecuación, considera la fracción de PAR que es absorbida por el dosel después de la reflexión de la superficie subyacente. Después de tomar la relación de la incidencia y reflexión de la irradiancia al mismo nivel la ecuación [13] se puede reescribir como:

$$F(t) = (1 - \rho_1(t)) - (1 - \rho_2(t)) \frac{P_{d2}}{P_{d1}} \quad [14]$$

Donde $\rho_1(t)$ y $\rho_2(t)$ son, respectivamente, la reflectividad de la radiación fotosintéticamente activa por encima y por debajo del dosel. Como las reflectividades son pequeñas y generalmente no varían mucho entre los distintos tipos de stands, la ecuación [14] demuestra que las principales tareas en la medición F_{PAR} es obtener P_{d2} y P_{d1} simultáneamente. Los valores por encima de P_{d1} no varían espacialmente en condiciones claras, permitiendo su medición a través de un sensor estacionario o predecirse cuando faltan datos (Leblanc et al., 2002).

2.3.2.2. Estimación de biomasa mediante sensores activos.-

Las condiciones climáticas de muchas zonas de la Tierra, limitan la adquisición de datos de calidad mediante el uso de sensores pasivos, ya sean por medio de fotografías aéreas o imágenes satelitales, es así como los sensores activos se convierten en una herramienta viable al momento de adquirir información de determinadas áreas, ya que no dependen de condiciones de luz o de la bondad del clima. En este grupo, se considera dos sistemas que predominan al momento de adquirir la información terrestre, siendo estos los sensores radar y LiDAR.



Dentro de este contexto y objetivo de este proyecto se describirá el potencial que se tiene al trabajar con datos de origen radar, esencialmente la estimación de biomasa a través sistemas con Radar de Apertura Sintética (SAR). Los sensores activos SAR emiten pulsos, los cuales una vez que interactúa con los materiales de la superficie terrestre estos son regresados al detector, en donde se registra la naturaleza de la energía resultante.

Las microondas emitidas por los SAR, tienen una longitud mayor, permitiendo penetrar en el dosel de los bosques, interactuando con elementos vegetales como hojas, troncos, ramas, proporcionando información de parámetros biofísicos necesarios para la estimación de biomasa (Le Toan & Floury, 1998).

La señal radar difusa por una superficie vegetal depende de dos tipos de factores:

- Factores geométricos relativos a la estructura del suelo y de la cubierta vegetal;
- Factores dieléctricos principalmente controlados por la humedad del suelo y del dosel (Dobson & Sharik, 1995).

Las propiedades estructurales sobre la señal recibida por el sensor de una cubierta vegetal son complejas, ya que se ve afectada por la frecuencia, la polarización, y el ángulo incidente de la señal emitida por el sensor, entre los parámetros más importantes tenemos la arquitectura del dosel (tamaño, forma y orientación de elementos difusos: hojas, ramas y troncos) y la rugosidad del suelo. La señal que recibe el sensor es la suma de dos contribuciones:

- La Difusión volumétrica;
- La Difusión superficie-volumen o efecto rebote (double bounce effect) (Beaudoin et al., 1994; Merino de Miguel & Solana Gutiérrez, 2000).

El entendimiento de estas relaciones es uno de los aspectos más importantes en la interpretación de las imágenes radar y en el desarrollo de ecuaciones y modelos para la obtención de parámetros forestales a partir de imágenes radar. En las siguientes figuras se diagrama las contribuciones que recibe el sensor (Merino de Miguel & Solana Gutiérrez, 2000).



Figura 2.20 Retro-difusión volumétrica: (a) suelo, (b) tronco, (c) copa

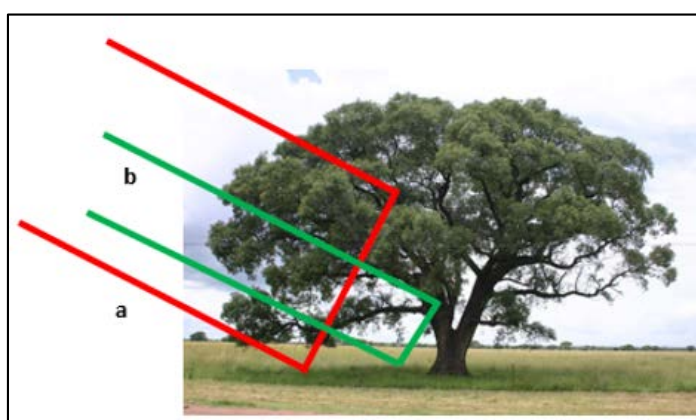


Figura 2.21 Retro-difusión superficie-volumen: (a) copa-suelo (b) tronco-suelo

En Lu (2006) se presenta un resumen de varias investigaciones desarrolladas por diversos autores, demostrando el potencial de los datos radar en la estimación de biomasa, recogiendo investigaciones desde los años 90's, entre estos, se tienen metodologías desarrolladas por Hussin, Ranson y Sun, Dobson, Saatchi, entre otros. (Kasischke, Melack, & Dobson, 1997) hacen una revisión de datos de radar para aplicaciones ecológicas, incluyendo la estimación de biomasa, y también se menciona la revisión de Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) para el mapeo y monitoreo de los bosques desarrollada por Balzter (2001), en la Tabla 2.4 se hace mención a algunas técnicas de estimación de biomasa a través del uso de sensores activos. Los diferentes datos radar tienen sus propias características en relación a los parámetros de la masa forestal, por ejemplo, la difusión radar para las bandas P y L, que están altamente correlacionadas con importantes parámetros forestales, tales como la edad del árbol, altura de los árboles, DAP, área basal, y biomasa aérea. En particular, los datos SAR de banda L han demostrado ser valiosos para la estimación de biomasa aérea. Por otro lado, las correlaciones bajas o insignificantes tienen relación entre los datos SAR con banda C y la biomasa aérea.



Tabla 2.4 Ejemplos de estimación de biomasa con radar (tomado de: Lu, 2006)

DATASETS	AREA DE ESTUDIO	METODOLOGIA APLICADA	REFERENCIA
SIR-C	Sureste de E.E.U.U.	Análisis de regresión múltiple	(Harrell, Kasischke, Bourgeau Chavez, Haney, & Christensen Jr., 1997)
SAR banda L	Bosque Les Landes, Francia	Modelo teórico adaptado	(Beaudoin et al., 1994)
AIRSAR bandas C, L, P	Freiburg, sureste de Alemania, Ruotsinkylä, Finlandia	Análisis de regresión lineal	(Rauste, Hame, Pulliainen, Heiska, & Hallikainen, 1994)
JERS-1 SAR banda L	Tápajos, Estado de Pará y Manaos, Amazonas, Brasil	Modelo de retrodispersión forestal	(Luckman et al., 1998)
JERS-1 SAR datos banda L	New South Wales, Australia	Análisis de regresión lineal	(Austin, Mackey, & Van Niel, 2003)
AeS-1 SAR banda p	Río Tápajos, estado de Pará, Brasil	Modelos de regresión (logarítmica y funciones polinomiales)	(Santos et al., 2003)
Airbone Laser	Costa Rica	Regresión lineal, modelos de altura de dosel	(Nelson, Oderwald, & Gregoire, 1997; Nelson, Jimenez, et al., 2000)
LiDAR de registro amplio	Noreste de Costa Rica	Análisis de regresión múltiple	(Drake et al., 2003)
LiDAR de registro corto	Fisiografía de Pie de monte en la provincia de Virginia, Sureste de E.E.U.U.	Mediciones de diámetro de la copa usando LiDAR, para estimar biomasa usando análisis de regresión	(Popescu et al., 2003)
LiDAR de registro corto	Turkey Lakes Watershed (TLW), Cerca de Sault Ste. Marie, Ontario, Canada	Un modelo multiplicativo	(K. Lim, Treitz, Baldwin, Morrison, & Green, 2003)

Modelo para estimar biomasa con el uso de sensores remotos Radar.-

Para el desarrollo del presente proyecto, se utiliza la metodología desarrollada por Saatchi et al. (2007), aplicada a la presente área de estudio, y adaptada a los sensores ALOS PALSAR de banda L, y Radarsat-2 de banda C. estas dos bandas son más sensibles a las ramas y troncos de menor grosor a diferencia de la banda P que parece distinguir mejor las ramas más grandes y el tronco del árbol (Mette, 2007), a continuación se describe los fundamentos teóricos del proceso a seguir, los mismos que permitirán una adaptación al presente estudio.

En los últimos años, existe un creciente interés en el uso de la teledetección mediante sensores activos, tales como el radar y LiDAR, gracias a los resultados favorables al estimar diversos componentes de la estructura del bosque. Varios estudios han demostrado el uso exitoso de los sistemas radar,

particularmente por que trabajan en frecuencias bajas (400-1500 MHz), siendo sensibles a la copa de los árboles, el tronco, propicios para estimar la biomasa y el contenido de humedad, llegando a ser tan precisas como las mediciones directas de la biomasa y la estructura. Por otro lado, las mediciones de Interferometría radar, llegan hacer capaces de proporcionar la altura de los bosques que se puede transformar fácilmente en contenido de biomasa cuando se combinan con las ecuaciones alométricas disponibles para los diferentes tipos de bosques.

El estudio realizado por Saatchi et al. (2007), se basó en el uso de sensores Radar de Apertura Sintética (SAR), utilizados en el desarrollo de la distribución espacial de áreas con más carga de biomasa y contenido de carbono, para la gestión de incendios forestales en el Parque Nacional de Yellowstone, mediante el desarrollo de algoritmos para estimación de biomasa y estructura del bosque.

La investigación realizada por el autor, se utilizaron imágenes polarimétricas del sensor AIRSAR que operaron en la banda P (435 MHz, ancho de banda de 20 MHz, 10 m de resolución), la banda L (1,25 GHz, 40 MHz de ancho de banda, de 5 m resolución) en modos totalmente polarimétricos, y la banda C (5.3 GHz, el ancho de banda de 40 MHz, 5 m de resolución) en la polarización vertical (VV) y modo interferométrico. Para todos los análisis de datos y desarrollo de algoritmos las imágenes tuvieron un proceso de resampled a una resolución de 10 m.

Estimación de componentes de biomasa forestal.-

La estimación de biomasa forestal a partir de datos del radar es posible debido a la relación física entre las mediciones de difusión radar y la estructura del bosque mediante sus componentes de biomasa. La señal retro difusa en polarizaciones lineales (HH, HV, VV; horizontal (H) y vertical (V) para transmitir y recibir las configuraciones, respectivamente) es sensible a los componentes estructurales que pueden resonar con la longitud de onda del radar. Al mismo tiempo, una fuerte difusión (sobre el nivel del ruido) es el resultado de los objetos con contenido de humedad razonable. En otras palabras, dependiendo de la longitud de onda de las mediciones en el retorno de la señal al radar, un bosque puede estar relacionado con la difusión de tallos vivos, ramas y follaje, en base a su contenido de abundancia y humedad dentro de una celda de resolución (Véase Figura 2.22). En la mayoría de los tipos de bosque, las etapas de sucesión se traducen en diferencias de los parámetros estructurales, tales como, el tamaño del árbol, la densidad y componentes de biomasa. Estos parámetros están relacionados directamente con el contenido de carbono en el dosel del bosque, que normalmente se consumen en incendios. Además, como combustibles forestales, son modelados sobre la base de la cantidad de componentes de biomasa de la vegetación, las mediciones de radar pueden proporcionar las estimaciones para los contenidos de carbono. Estas estimaciones se pueden obtener a través de dos tipos de análisis:

- Análisis estadístico (v.g. análisis de regresión)
- Análisis de inversión de los modelos basados en la física de retro-difusión.

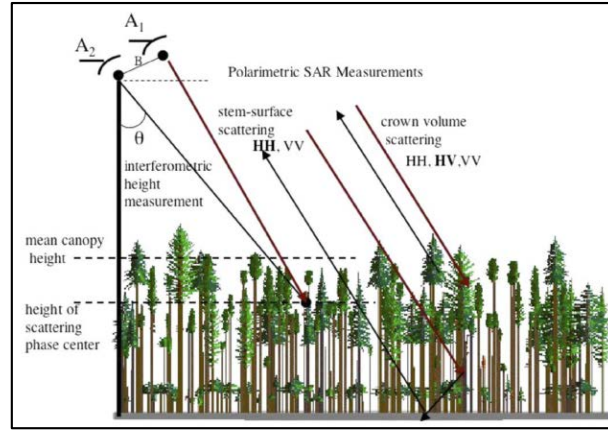


Figura 2.22 Polarimetría SAR y mediciones de Interferometría un bosque típico, con polarizaciones dominantes contribuyendo a la copa y el tallo de la superficie (fuente: Saatchi et al., 2007)

El análisis estadístico se basa en la correlación de las mediciones de difusión radar a diferentes frecuencias y polarizaciones, con la estructura del bosque y componentes de biomasa obtenidos a partir de mediciones de campo. Al separar los modelos de regresión basado en el tipo de bosque y en la topografía, se puede mejorar la precisión de la estimación de biomasa. La estimación de los parámetros estructurales del bosque y de los modelos basados en la física, por otra parte, requiere técnicas de inversión, tales como, análisis semi-empíricos, análisis paramétricos, o el uso de redes neuronales. La medición de la difusión radar de una masa forestal incluye varios mecanismos de difusión, como se muestra en la Figura 2.22. En general, los mecanismos de difusión son de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\sigma^0 &= \sigma_{gr}^0 + \sigma_{veg}^0 \\ \sigma_{gr}^0 &= (1-\eta)\sigma_s^0 + \eta\sigma_s^0 e^{-\beta W} \\ \sigma_{veg}^0 &= \eta\sigma_v^0 (1 - e^{-\beta W}) + \eta\sigma_{vs}^0 e^{-\beta W}\end{aligned}\quad [15]$$

Donde (η) es la fracción del área ocupada por el dosel del bosque, ($e^{-\beta W}$) es la transmitancia de la vegetación siendo (β) una atenuación del bosque de doble vía, y (W) es la biomasa, asumiendo el 100% del peso seco. La serie de ecuaciones dadas en [15] simplifica un modelo difusión más complejo, con diferentes mecanismos de difusión. La ecuación superior divide la difusión total (σ_0) la difusión del suelo (σ_{gr}) y en difusión de la vegetación (σ_{veg}).

La difusión de suelo (σ_{gr}) incluye la difusión directa de la superficie ponderada con un coeficiente de $(1-\eta)$ y un segundo término que representa la difusión de la superficie bajo el dosel de la vegetación.

La contribución de la vegetación (σ_{veg}) incluye el volumen de la difusión directa (σ_v^0) y la interacción de

la superficie y el volumen (σ_{vs}^0). El volumen de difusión directa (σ_v^0) y la interacción de la superficie y el volumen (σ_{vs}^0) son a la vez una función del contenido de humedad de la vegetación y la biomasa.

Para simplificar, el bosque se considera como una sola capa, de tal manera, que se suprimen los subíndices que muestran los coeficientes de polarización transmitidos y recibidos. Mediante la inclusión de las polarizaciones de onda en el conjunto de ecuaciones [15], todos los términos, excepto la biomasa (W) y la fracción de la cubierta forestal (η) son diferentes. En otras palabras, la difusión de polarimetría radar puede proporcionar mediciones independientes de la estructura del bosque y de la biomasa.

El modelo planteado por Saatchi et al. (2007) tiene una forma cuadrática para imitar aproximadamente la pérdida de sensibilidad de la difusión de radar en valores de biomasa más altas. Mediante la sustitución de W por su logaritmo natural $\log(W)$ y los coeficientes de difusión en decibelios como $10 \log(\sigma^0)$, la forma general del modelo de regresión puede escribirse como:

$$\log(W) = a_0 + a_1 \sigma_{HV}^0 + a_2 (\sigma_{HV}^0)^2 + b_1 \sigma_{HH}^0 + b_2 (\sigma_{HH}^0)^2 + c_1 \sigma_{VV}^0 + c_2 (\sigma_{VV}^0)^2 \quad [16]$$

Donde $\log(W)$ es la biomasa aérea total, y σ_{HV}^0 , σ_{HH}^0 y σ_{VV}^0 , respectivamente, representan las mediciones de difusión de radar en las tres configuraciones de transmisión y recepción de polarización. La ecuación [16] puede ser considerada una ecuación paramétrica incluyendo todos los mecanismos de difusión representados por las mediciones polarimétricas radar. La ecuación [16] es de un polinomio de segundo orden, que puede expresarse a partir de [15] sustituyendo W por $\log(W)$ y la expansión de cada término en $\log(W)$. Las siguientes ecuaciones se utilizan como base del modelo semiempírico para estimación de biomasa de la copa y el tallo respectivamente.

$$\begin{aligned} \log(W_c) = & a_0 + a_1 \sigma_{HV}^0 \cos(\theta_0 - \theta_l) + a_2 (\sigma_{HV}^0 \cos(\theta_0 - \theta_l))^2 \\ & + b_1 \sigma_{HH}^0 \sin(\theta_0 - \theta_l) + b_2 (\sigma_{HH}^0 \sin(\theta_0 - \theta_l))^2 + c_1 \sigma_{VV}^0 \cos(\theta_0 - \theta_l) + c_2 (\sigma_{VV}^0 \cos(\theta_0 - \theta_l))^2 \end{aligned} \quad [17]$$

$$\begin{aligned} \log(W_s) = & a_0 + a_1 \sigma_{HV}^0 \sin(\theta_0 - \theta_l) + a_2 (\sigma_{HV}^0 \sin(\theta_0 - \theta_l))^2 \\ & + b_1 \sigma_{HH}^0 \cos(\theta_0 - \theta_l) + b_2 (\sigma_{HH}^0 \cos(\theta_0 - \theta_l))^2 + c_1 \sigma_{VV}^0 \cos(\theta_0 - \theta_l) + c_2 (\sigma_{VV}^0 \cos(\theta_0 - \theta_l))^2 \end{aligned} \quad [18]$$

Donde W_c y W_s son, respectivamente, la biomasa de la copa (foliar) y el tallo (madera), los ángulos θ_0 y θ_l son los ángulos de incidencia de la plataforma SAR tomados en el centro del píxel de la imagen y el ángulo de incidencia local en la misma ubicación. Cuando θ_0 y θ_l son iguales, la superficie no tiene topografía, y la biomasa se estima a partir de los términos que representan la difusión del mecanismo dominante del bosque sobre una superficie plana. El ángulo de incidencia local, se calcula en función de la inclinación de la superficie y se representan de la siguiente manera:

$$\cos(\theta_l) = \sin \alpha \sin \theta_0 \cos(\beta - \beta_s) + \cos \alpha \cos \theta_0 \quad [19]$$

Donde α es la pendiente local, β es el ángulo de acimut en la dirección de iluminación del radar, y β_s es el ángulo de aspecto en la pendiente local.

CAPITULO III METODOLOGIA

3.1. SISTEMA Y MARCO DE REFERENCIA EUROPEO.-

Para definir la posición de un punto sobre la superficie de la tierra se ha tratado de dar una representación a la misma por medio de la generación de modelos matemáticos. Los modelos matemáticos, han tomado formas esféricas y elipsoidales a través de la historia, y han sido desarrollados tomando como referencia parámetros físicos de la superficie terrestre (Rojas Unda, 2011).

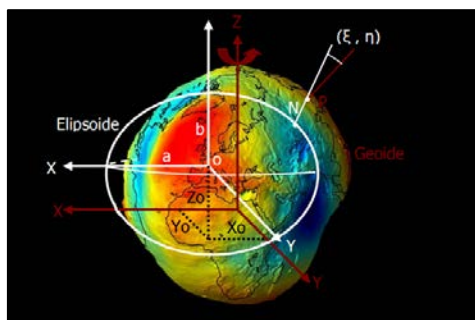


Figura 3.1 Sistema Geodésico local (fuente: Furones, 2010)

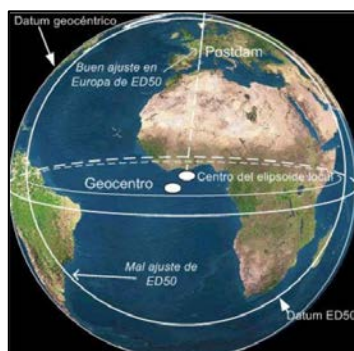


Figura 3.2 Dátum local y geocéntrico (fuente: Torge, 1983)

Existen principalmente dos tipos de sistemas de referencia:

Sistemas Locales: Son sistemas en los cuales el centro del sistema de coordenadas (Dátum) se encuentra sobre la superficie terrestre. Son modelos que se ajustan más a la forma del geoide en ciertas regiones de la tierra.

Sistemas Globales: Son sistemas de referencia que definen su origen de coordenadas en el centro de masas de la tierra. El Dátum se llama también geocentro. La forma del elipsoide en este caso se ajusta al geoide de una manera global (Rojas Unda, 2011).

3.1.1. Sistema de referencia terrestre internacional (ITRF).-

El sistema de referencia terrestre internacional convencional se materializa a través de las coordenadas de una serie de estaciones distribuidas por todo el mundo en ese sistema de referencia, constituyendo el Internacional Terrestrial Reference Frame (ITRF), establecido y mantenido por la Internacional Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). Básicamente el sistema que materializa se define como geocéntrico (incluyendo la atmósfera y los océanos) y con orientación de sus ejes.

- Eje Z: Polo medio determinado por la IERS y llamado IERS Reference Pole (IRP) o Convencional Terrestrial Pole (CTP);
- Eje X: Meridiano de Greenwich Convencional determinado por la IERS y llamado IERS Reference Meridian (IRM) o Greenwich Mean Origin (GMO);
- Eje Y: Formando una tripleta dextrógira con los ejes anteriores sobre el plano del ecuador convencional.

El marco está formado por coordenadas cartesianas y velocidades de una serie de estaciones equipadas con técnicas de observación espacial (VLBI, SLR, LLR, GPS desde 1991 y DORIS desde 1994), (Véase Figura 3.3). Si se desean coordenadas geodésicas se recomienda el uso del elipsoide GRS80. Estas coordenadas definen implícitamente los ejes coordenados X, Y, Z, del sistema de referencia, por lo que proporcionan su orientación (Furones, 2010).

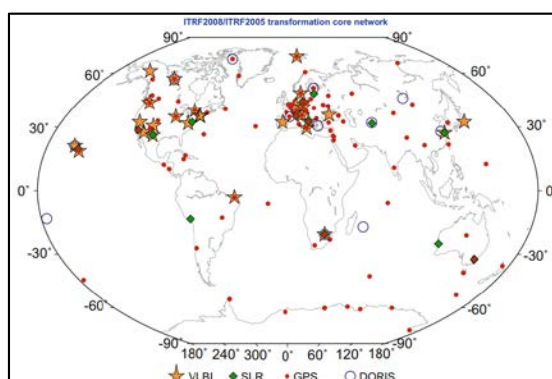


Figura 3.3 Distribución de las técnicas de observación (fuente: Altamimi, Collilieux, & Métivier, 2011)



3.1.2. Sistema y Marco de Referencia Terrestre Europeo (ETRF89).-

La Subcomisión de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) para el marco de referencia europeo (EUREF), recomendó que el Sistema de Referencia Terrestre para Europa que debía ser adoptado (Florencia, 1990), denominado European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89).

ETRS89 está definido en origen por la campaña IBERIA95 y BALEAR98 las cuales se calcularon a partir del ITRF96 época 1995,4 y época 1998,3 respectivamente. El Real Decreto 1071/2007 establece ETRS89 como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares. El sistema tiene asociado el elipsoide GRS80 y están materializados por el marco que define la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales, REGENTE y sus densificaciones [<http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesGeodesiaStmagd.do>].

3.2. ÁREA DE ESTUDIO.-

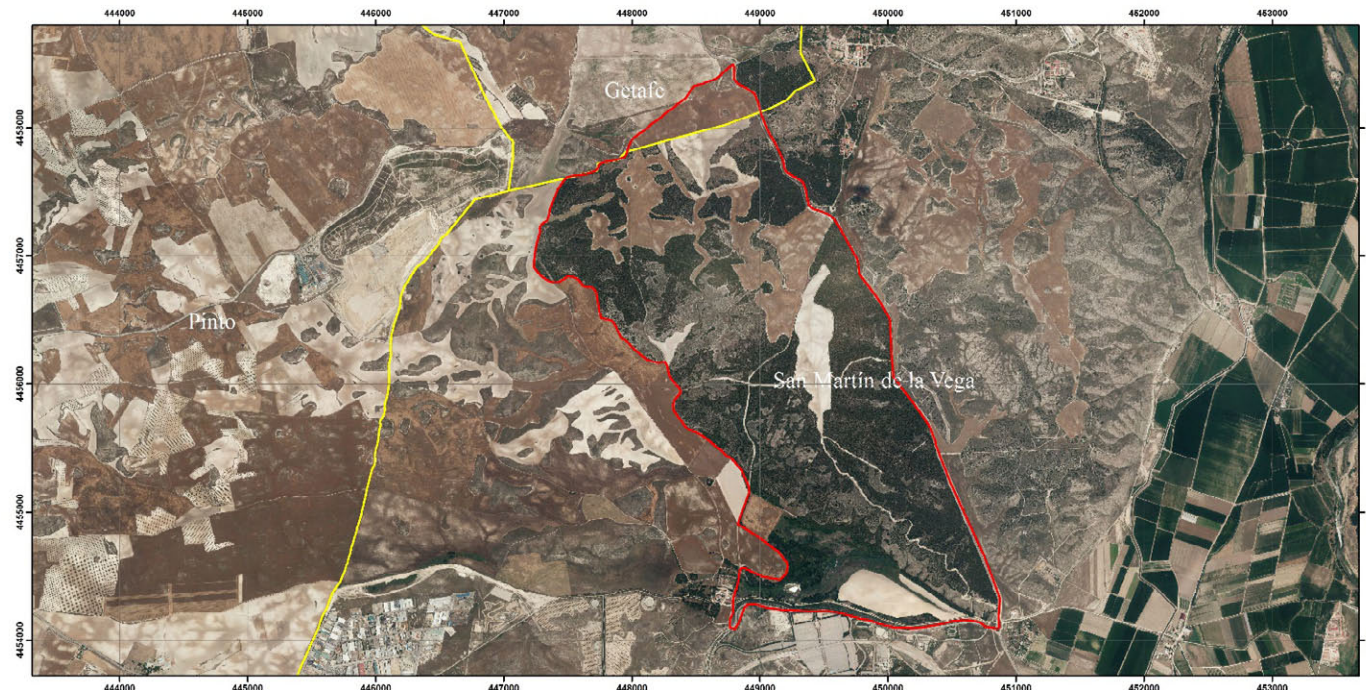
El área de estudio seleccionada para el desarrollo del presente proyecto, se encuentra ubicada al noroccidente del municipio de San Martín de la Vega (Véase Mapa 3.1), perteneciente a la comunidad de Madrid, donde más del 80% del municipio está incluido en ámbito del Parque Regional del Sureste. Se ha elegido un bosque de repoblación de pino carrasco (*Pinus halepensis*), en las cercanías del parque temático Warner, el área de estudio tiene un superficie aproximada de 745 ha, en esta área existen algunos humedales como el de la presa de Gozques, configurado principalmente por cañaveral de enea y los de los Albardales (Zona de Reserva Ornitológica), pese a la proximidad del casco urbano, son habituales zonas de paso de aves migratorias, e invernada de otras, que en la época estival marchan más al norte. El clima en el sector presenta veranos calurosos e inviernos fríos. Según la caracterización agroclimática de la provincia de Madrid, la precipitación media anual oscila entre los 450 y los 500 mm y la temperatura media anual entre los 13 y 14 °C, siendo en periodo estival entre 22 y 25 °C y en invierno de 6 °C. [Wikipedia].

Dada las características topográficas del sector, así como su interés de conservación, se decidió seleccionar esta área de estudio, con la finalidad de aplicar una metodología no destructiva de estimación de biomasa, estas metodologías se dividirían en la aplicación de varias mediciones indirectas (i.e. estimación de biomasa foliar mediante imagen radar de banda C, correlacionadas mediante la aplicación de la teoría de fracción de huecos <<TRAC, y DHP>>, y estimación de biomasa de madera mediante imagen radar de banda L, a través de la correlación de medidas dasométricas <<ecuaciones alométricas>>).

Para la definición del área de estudio, se ha utilizado un mosaico de ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea de España (PNOA), adquiridas a través del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN), con una resolución espacial de 0,25m, definiendo el límite del bosque mediante herramientas de edición SIG.

ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR

ÁREA DE ESTUDIO



Croquis de Ubicación



Simbología	
Región	Área (ha)
	Área de estudio preliminar: 745,06
	Municipios Comunidad de Madrid
Ortofoto PNOA (0,25m)	
RGB	
	Red: Band_1
	Green: Band_2
	Blue: Band_3

Proyección: Universal Transversa de Mercator
Zona: 30 Norte
Sistema de Referencia: ETRS 89

0 500 1.000 2.000 Metros

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID	
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR	
CONTIENE: ÁREA DE ESTUDIO	
ESCALA: 1:25.000	Mapa No.: 01
FUENTE DE INFORMACIÓN: Ortofoto del PNOA cedida por © Instituto Geográfico Nacional de España Año adquisición ortofoto: 2011 - 2012	
Fecha: Junio de 2015	

Mapa 3.1 Área de estudio



3.2.1. Delimitación de áreas para toma de muestras.-

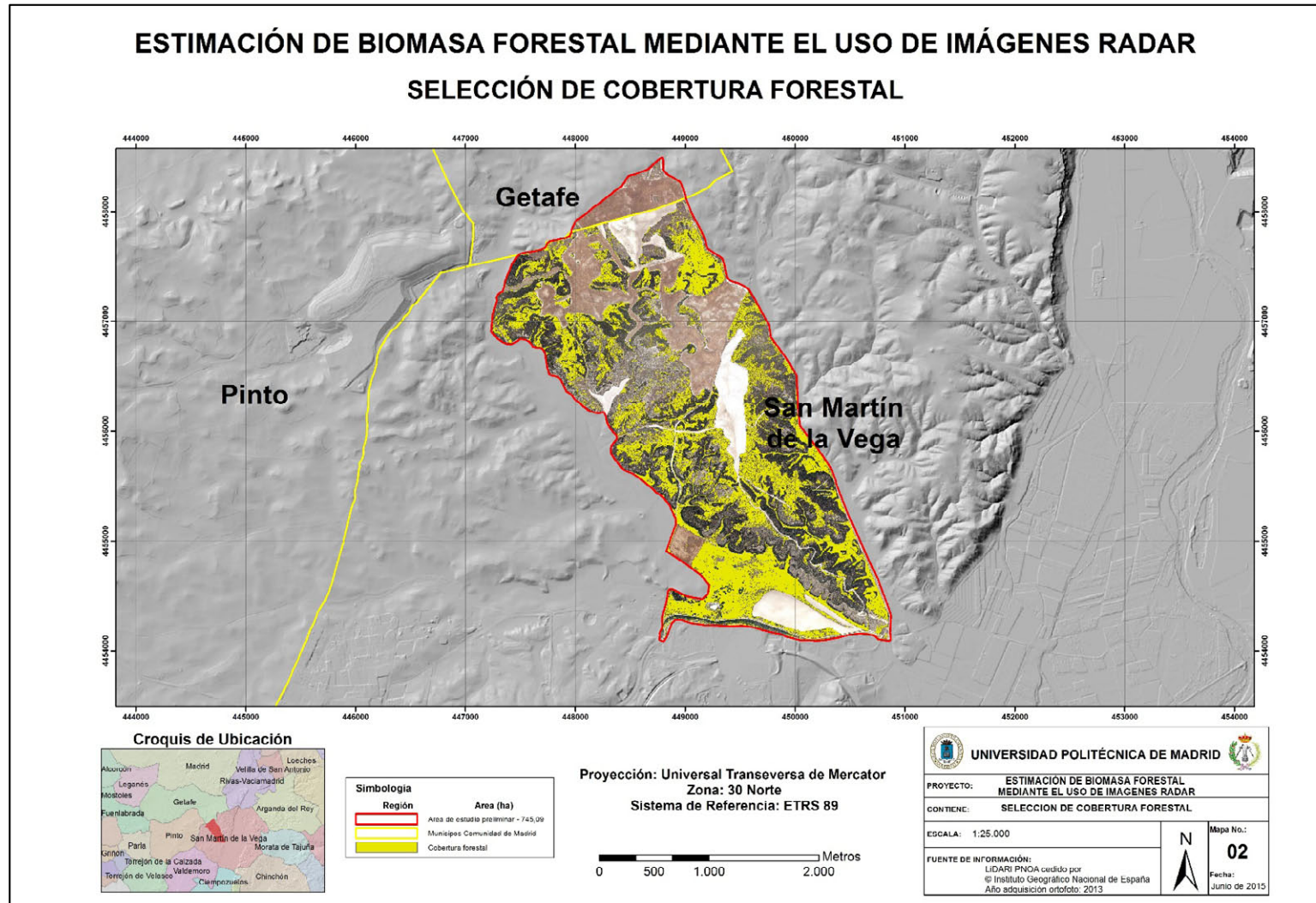
La unidad de muestreo permite relacionar la localización de la información del mapa y del terreno. Puede ser un punto, un píxel, un polígono del mapa o una unidad de superficie con formas predeterminadas, por ejemplo, un cuadro o un círculo de una hectárea. No existe un consenso definitivo sobre la unidad de muestreo más adecuada (Chuvienco Salinero, 1996); su elección depende en mucho de los objetivos de la evaluación, del proceso de mapeo, de la estructura del paisaje y de las categorías que más le interesan al usuario. En el caso de unidades de superficie predeterminadas, la superficie que debe cubrir el sitio de muestreo es también delicada de determinar, un sitio de verificación grande puede incluir varias porciones de polígonos en el mapa y varios tipos de cubierta en el terreno o en la imagen de referencia, lo que genera ambigüedades al confrontar la información del sitio de verificación con la del mapa. Al contrario, un sitio de verificación pequeño puede coincidir con una unidad del paisaje no representada en el mapa por ser más pequeña que el mínimo cartografiable del mismo (Mas, Díaz Gallegos, & Vega, 2003)

La delimitación de las unidades de muestreo a considerar para la toma de muestras, son superficies que tienen características especiales, definidas en función de la movilidad, presupuesto (Véase Anexo 8), topografía, y tipo de cobertura vegetal, esta definición, se ha realizado mediante el uso de herramientas SIG y de procesos de interpretación de imágenes (i.e. clasificación de ortofoto para cobertura de suelo, mapa de pendientes). Estos dos procesos iniciales se realizan con la finalidad de discriminar las áreas de bosque a considerar. Las características a tomar en cuenta son:

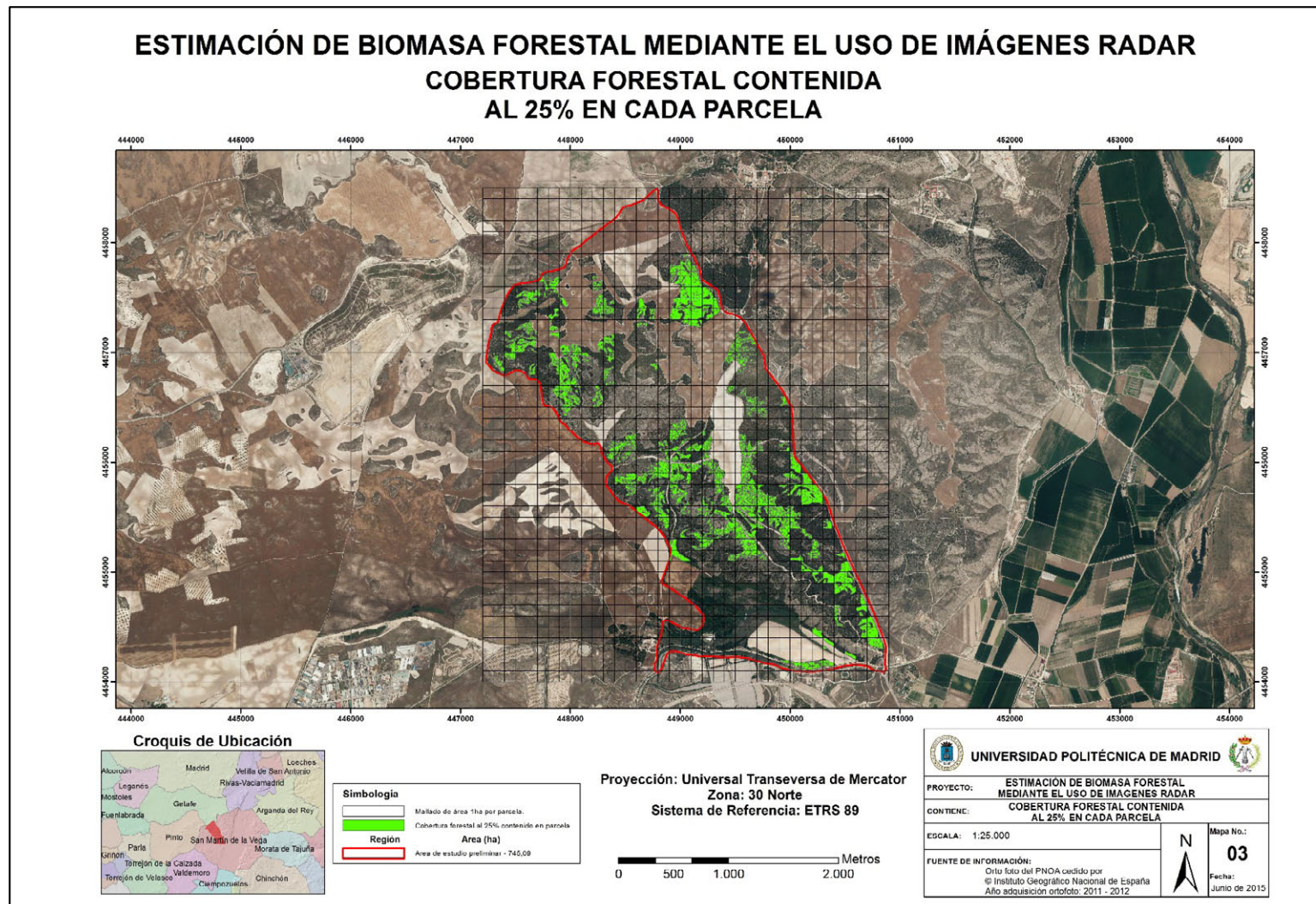
- Zonas planas, es decir que no supere una pendiente del 15%;
- Abarcar un 25% de la parcela de muestreo (tamaño parcela de 1ha.).

A fin de cumplir los dos requerimientos característicos del bosque a muestrear, se genera un mapa de pendientes, a partir del Modelo digital del terreno de 5m, elaborado mediante datos LiDAR, obtenido del IGN, y se realiza una clasificación no supervisada del área de estudio. El proceso de obtención de un mapa temático de cobertura vegetal, permite discriminar las especies vegetales, y definir, únicamente las zonas donde existe presencia de bosque (para el caso de estudio se considera una sola especie vegetal a analizar, sin embargo este fundamento ayudaría en diversas regiones donde existe más de una especie forestal).

A través del uso de herramientas SIG, se discrimina las zonas de bosque que están en pendientes no superiores al 15%, (Véase Mapa 3.2), con los bosques seleccionados (posterior a proceso de edición y filtrado), se procede a parcelar la zona de estudio, mediante una mallado de 100x100 m. (1ha) recomendado por Leblanc (2004), que cubre toda el área de estudio, a fin de seleccionar las coberturas de bosque que se encuentran contenidas con un mínimo de 25% dentro de la parcela (Véase Mapa 3.3), estos procesos son necesarios para elegir un método de muestreo apropiado.



Mapa 3.2 Selección de cobertura forestal



Mapa 3.3 Cobertura forestal contenida al 25% en cada parcela

3.2.2. Tamaño de la muestra y tipo de muestreo.-

La columna vertebral de un proceso de verificación, es el diseño y desarrollo del muestreo espacial, que sirve para seleccionar una parte del área de estudio, de forma tal, que sea suficientemente representativo del conjunto. La semejanza con la población de referencia debe conseguirse minimizando el tamaño de la muestra, a fin de reducir los costos de los procesos de verificación (levantamiento de la información en campo) (Rojas Unda, 2011).

Para el desarrollo del presente proyecto se considera la ecuación estadística para una población finita (Fernández, 1996), ya que, en el proceso de selección de cobertura forestal con un mínimo de 25% de contenido dentro de cada parcela de estudio, permitió definir una población finita de parcelas a considerar con un valor de 254 (N) .

$$n = \frac{Z^2 \alpha p q N}{(N-1)E^2 + Z^2 \alpha \times p q} \quad [20]$$

- n= Tamaño de la muestra;
- $Z^2 \alpha$ = Nivel de confianza 95%;
- p= Proporción (0.5);
- E^2 = Error de estimación 21% (Para este proyecto se considera este valor, a fin de obtener una tamaño de muestra acorde a las posibilidades de movilidad y presupuestos (Véase Anexo 8);
- q= porcentaje estimado de errores ($q= 1 - p$).

El cálculo de Z está dado por en la Tabla 3.1, desarrollando la ecuación con el valor de N, se obtiene que el número de muestras a tomar, siendo $n = 20$.

Tabla 3.1 Cálculo de la abscisa de la curva normal para un valor determinado valor (Z) (fuente: Rojas Unda, 2011)

**TABLA DE APOYO AL CALCULO DEL TAMAÑO DE UNA MUESTRA
POR NIVELES DE CONFIANZA**

Certeza	95%	94%	93%	92%	91%	90%	80%	62.27%	50%
Z	1.96	1.88	1.81	1.75	1.69	1.65	1.28	1	0.6745
Z2	3.84	3.53	3.28	3.06	2.86	2.72	1.64	1.00	0.45



Definido el tamaño de muestra es necesario que estos sean distribuidos en toda el área de estudio, con las respectivas coberturas forestales previamente analizadas, este proceso se lo realiza mediante un análisis de muestreo aleatorio simple, la misma que proporciona una equidad en las probabilidades de ser seleccionados, considerando que la elección no influya en la siguiente, es un método sólido estadísticamente, presentando las siguientes características:

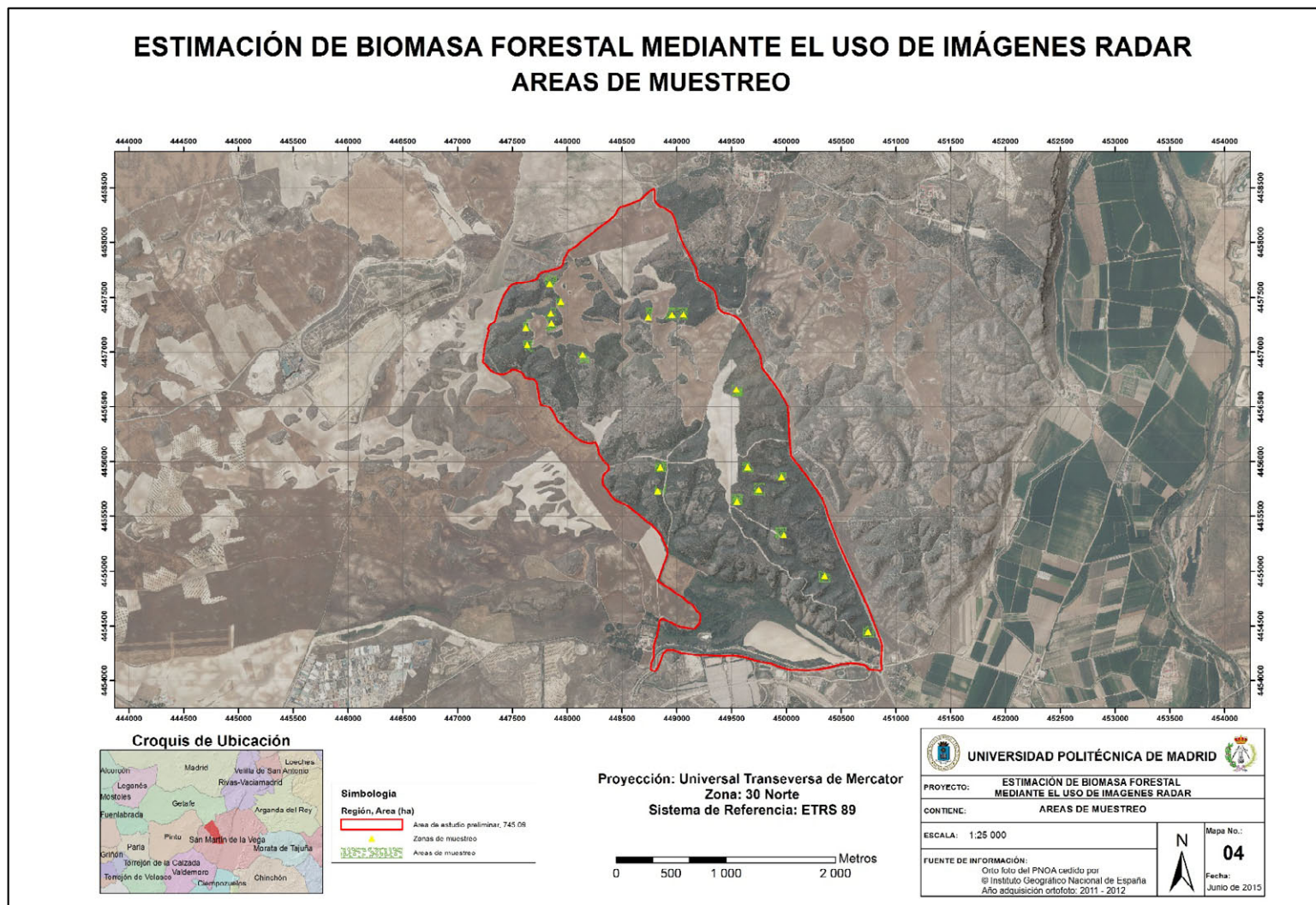
Ventajas:

- Sencillo y de fácil comprensión;
- Cálculo rápido de medias y varianzas.

Desventajas:

- Requiere que se posea de antemano un listado completo de toda la población;
- Cuando se trabaja con muestras pequeñas es posible que no represente a la población adecuadamente (Rojas Unda, 2011).

Con la selección de las zonas a analizar, obtenidas mediante el método de muestreo aleatorio simple, considerando el tamaño de muestra, se obtiene una cobertura forestal (Véase Mapa 3.4), en las que se toman las respectivas medidas de campo, de acuerdo a las metodologías a utilizar (i.e. parámetros para ecuaciones alométricas, fotográficas hemisféricas, y medidas TRAC, correlacionados con las bandas C, y L, de imágenes radar).



Mapa 3.4 Áreas de muestreo

3.3. MEDIDAS EN CAMPO.

Con la determinación de las zonas idóneas para el muestreo de campo, se procede a definir un protocolo de medidas en campo, para las metodologías a utilizar, para ello, se adapta las guías descritas por Leblanc (2004); Mostacedo & Fredericksen (2000); Walker et al. (2011), a fin, de unificar el registro de datos (i.e. DHP, TRAC), con la adquisición de información estructural del árbol.

Cuando concierne a estimaciones de carbono y biomasa forestal, las parcelas de muestreo tienen que ser lo suficientemente grandes para que incluyan cualquier variabilidad local en cuanto al tipo y la densidad de los árboles existentes. Por lo tanto, parcelas más grandes (v.g., 100 m x 100 m) son generalmente preferidas a las parcelas más pequeñas (v.g., 25 m x 25 m) (Walker et al., 2011), estas parcelas deben tener orientado uno de los vértices al norte (Véase Figura 3.4), para este propósito, se utiliza las coordenadas generadas a partir de las áreas de muestreo (Véase Anexo 2), las mismas que son localizadas mediante un equipo GPS navegador.

Esta configuración del tamaño de la parcela, permite una cobertura máxima para cada instrumento de medición óptica, sin embargo para mediciones forestales típicas (i.e. medidas del árbol) se ha adaptado la metodología de punto centro cuadrado descrita en Mostacedo & Fredericksen (2000), estas dos configuraciones de muestreo, proporcionan un solapamiento necesario para el cálculo de las metodologías aquí propuestas.



Figura 3.4 Delimitación de parcela de muestreo

3.3.1. Medidas del árbol.-

La medición forestal más común es el diámetro a altura de pecho (DAP) de los árboles, esta medida es una convención universal, en la que se mide el diámetro con corteza (a menos que se determine lo contrario), a una altura fija desde el nivel del suelo, esta medida estándar es la altura del pecho, la misma que puede variar ligeramente entre algunos países (En la Europa continental, Australia, Reino Unido, Canadá, entre otros se considera la altura del pecho definida como 1,30 m de altura desde el suelo; En Nueva Zelanda, India, Malasia, Sudáfrica y algunos otros países la altura del pecho se considera como

1,40 m desde el suelo; En Estados Unidos se usa 4,5 pies “1,3716 m”; y en Japón 1,25 m), las mediciones del DAP son utilizadas para calcular estimaciones de volumen de madera, área basal y biomasa sobre el suelo (carbono) de árboles individuales y bosques enteros. Tomar la medición del DAP de un árbol es relativamente fácil de hacerlo (Véase Fotografía 3.1), y con un poco de práctica, las medidas de varios árboles pueden ser obtenidas de manera rápida y precisa (Walker et al., 2011).



Fotografía 3.1 Medición del Diámetro a altura de pecho en Campo

De acuerdo a la Guía de Campo para la estimación de Biomasa y Carbono Forestal desarrollada por Walker et al. (2011), se recomienda que se mida todo árbol vivo cuyo diámetro sea igual, o más grande que 5 cm, sin embargo para el presente estudio se toma el diámetro superior a 10 cm de acuerdo a Brown (1997), este umbral asegura que la mayoría de los árboles contribuyen al total de la biomasa sobre el suelo. No se mide los árboles muertos, ya que tienen la tendencia a permanecer en pie, relativamente por cortos períodos de tiempo antes unirse al carbono del suelo. No obstante las medidas de todo árbol vivo presente en la parcela de estudio, representa un excesivo desgaste de tiempo, recursos y mano de obra, por este motivo se adapta la metodología de Punto centro cuadrado; este método está basado en la medida de cuatro puntos a partir de un centro, específicamente, consiste en ubicar puntos a través de una línea (v.g. senda, línea imaginaria), cada cierta distancia (20 metros en cada dirección cardinal a partir de la coordenada de muestreo para este estudio,) o al azar, se debe ubicar un punto a partir del cual se hace el muestreo de la vegetación. En este punto se cruzan dos líneas imaginarias, con las cuales se obtienen cuadrantes de 90°. En cada cuadrante se debe ubicar el árbol más cercano al punto central y tomar la medida respectiva, en cada punto se consideran solo 4 árboles (Mostacedo & Fredericksen, 2000), en la Figura 3.5 se presenta la configuración para la adquisición de las medidas del árbol, en la Fotografía 3.2 se puede apreciar una vista de 360° de la parcela No.6.

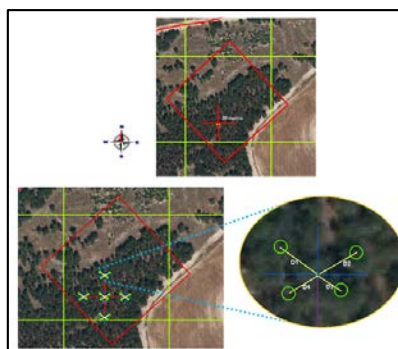


Figura 3.5 Configuración para la adquisición de medidas del árbol



Fotografía 3.2 Vista de 360° de la parcela 6 del área de estudio

3.3.2. Medidas DHP y TRAC.-

Las mediciones TRAC deben tomarse por la mañana y al atardecer, mientras que las fotografías hemisféricas se pueden tomar en cualquier momento donde las condiciones del cielo presenten características isotrópicas (i.e. que la intensidad de luz sea igual en todas las direcciones), en la siguiente figura se presenta una configuración para la adquisición de las medidas de DHP y TRAC (Leblanc, 2004).

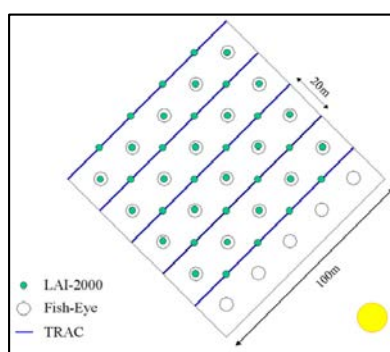


Figura 3.6 Adquisición de datos basados en el protocolo Bigfoot del proyecto SIBLAI de la NASA (fuente: Leblanc, 2004)

3.3.2.1. Adquisición de DHP y TRAC.-

Las fotografías deben ser adquiridas, preferentemente cerca del amanecer o al atardecer, las nubes uniformes pueden dar un cielo difuso perfecto, pero la intensidad de la luz bajo las nubes uniformes frecuentemente puede ser muy brillante y con usualmente pueden causar un efecto de blooming en las fotografías.

El protocolo de adquisición de fotografías hemisféricas está basado en el Manual de fotografía hemisférica digital Leblanc (2004) (Véase Fotografía 3.3) y la adquisición de datos TRAC hace referencia al manual descrito por Leblanc et al. (2002), se debe recordar que la adquisición de los datos TRAC, se los debe realizar manteniendo nivelado el instrumento, y manteniendo un ritmo de paso lento y constante (Véase Fotografía 3.4), estos dos manuales describen todos los pasos necesarios para la configuración de los equipos, la instalación de los instrumentos, la adquisición de fotografías y datos, finalizando con el análisis de la información adquirida.



Fotografía 3.3 Adquisición de DHP

A parte de los protocolos de adquisición de información, para este proyecto, se ha propuesto el uso de una hoja de campo, la misma que tiene la finalidad, de llevar el registro de la información adquirida de manera física, en la Figura 3.7, se diagrama un ejemplo de la hoja de campo, este registro esta descrito en el Anexo 3.



Fotografía 3.4 Adquisición de medidas TRAC





 HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION 			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA:	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	FOTOGRAFIA/LÍNEA #
ALTURA ELIPSOIDAL		MÉTODOLÓGIA SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO	
		TRAC	
		DHP	
		ALOMETRIA	
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: Hora de Inicio: Hora de Finalización:		Croquis de parcela:	
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.			

Figura 3.7 Hoja de Campo

3.4. IMÁGENES RADAR.-

La formación de imágenes radar a partir de Sistemas SAR es un enfoque alternativo a la observación remota de la tierra, que ofrece varias ventajas sobre la tecnología de detección visible e infrarroja. Debido a que el radar es un sistema de detección activa, que no se basa en la energía reflejada o en la radiación de la superficie de la tierra, ya que proporciona su propia fuente de iluminación, por lo tanto, las imágenes adquiridas por estos sensores pueden ser adquiridas en cualquier momento del día o noche. Además, el radar opera en la región de microondas del espectro electromagnético, permitiendo longitudes de onda más largas las que pueden penetrar las nubes, neblina o la lluvia, lo que permite el funcionamiento en condiciones climáticas desfavorables a diferencia del uso de sistemas que operan en las regiones visibles o infrarrojas. El uso de la energía de microondas también permite la observación de ciertas propiedades de la tierra, apreciables únicamente en la región de microondas. Los Sistemas Radar

de Apertura sintética abarcan una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la generación de mapas geológicos de la alta resolución, la vigilancia oportuna del mar y de las coberturas de hielo, brinda una precisa estimación de biomasa forestal en regiones tropicales, donde a menudo permanecen impenetrables a técnicas de teledetección visibles o infrarrojas. Los Sistemas SAR pueden ser aerotransportados o satelitales, con cobertura regional y mundial, con una periodicidad que se puede ajustar a las necesidades. Son sistemas coherentes que conservan tanto la fase y la magnitud de cada señal de retorno, algunos parámetros de funcionamiento del sistema, tales como la incidencia y el ángulo de aspecto, la frecuencia con la que opera el sistema, y las polarizaciones del mismo, afectan a la amplitud del eco, así como las características de retrodispersión del objetivo. El sistema SAR tiene diversas arquitecturas que soportan una amplia gama de aplicaciones. Algunos sistemas tienen capacidades de multifrecuencia y multipolarización que permiten la caracterización de muchos tipos de objetos y superficies. Los sistemas que operan en longitudes de onda más largas (i.e. banda-P -75 cm- y banda-L -24 cm-), proporcionan importantes beneficios, principalmente para objetos de mayor tamaño, estas bandas permiten la penetración en nieve, en coberturas vegetales, y, en determinadas condiciones, la penetración en la arena y en el suelo. Las longitudes de onda más cortas (i.e. banda-C -5,6 cm- y banda-X -3 cm-), son útiles para la delimitación de pequeñas características, además las radiación en estas bandas tienden a reflejarse más en los doseles de la vegetación, en la acumulación de nieve, y en coberturas de suelo, permitiendo la caracterización de estos tipos de superficies. Cada banda proporciona varias combinaciones de polarización, teniendo así las combinaciones de transmisión horizontal / recepción horizontal (HH) o de transmisión vertical / recepción vertical (VV), las que tienden a detectar la difusión de los objetos orientados en la misma dirección que la onda incidente. También se tiene polarizaciones cruzadas de transmisión horizontal / recepción vertical (HV) o de transmisión vertical / recepción horizontal (VH) que sirven para detectar la respuesta de retorno a partir de dispersiones múltiples, tales como, la difusión en el dosel de bosques, o la de rebote múltiple (v.g. suelo-árbol la que determina la respuesta de retorno del tronco). Las polarizaciones tienden a proporcionar los retornos de retrodispersión más fuertes, mientras que, las polarizaciones cruzadas tienden a ser menos afectadas por el ángulo de incidencia y las variaciones de pendiente. El modo polarimétrico permite la síntesis de cualquier combinación de polarización, incluyendo la polarización circular. Por lo tanto, un sistema que tiene múltiples frecuencias y múltiples capacidades de polarización puede adaptar estos parámetros de configuración, permitiendo mejorar la producción de imágenes para varios tipos de superficie y diferentes tipos de escenas (Birk et al., 1995).

En la Tabla 3.2 se muestra parámetros de funcionamiento para algunos sistemas, estos valores y sus características son consideraciones importantes al momento de hallar una correspondencia entre el sistema y su aplicación, otros factores a tener en cuenta son la frecuencia de revisita, área de cobertura, y el tipo de producto.



Tabla 3.2 Comparación Sistema SAR (tomado de: Birk et al., 1995)

Parámetro/Sistema	Frecuencia de Banda	Polarización	Cobertura	Ángulo de Incidencia	Resolución	Plataforma	Altitud	Geometría Orbital	Inclinación	Colección de datos	Repetición de ciclo
AIRSAR/TOPSAR	P (0.4 GHz) L (1.25 GHz) C (4.6 GHz)	HH, VV, HV, VH	12 km de ancho x 60 km de largo	0° - 70° Seleccionable	Alcance: 4 - 8 m Azimuth: 4 - 8 m	DC-8, Aerotransportado	8 - 12 km	N/A	N/A	6 horas por vuelo	Según requerimiento
DCS	X (9.66 GHz) Ku (14.28 GHz)	Banda X, todas las polarizaciones; Ku, VV	225 - 1500 m	Aproximadamente 2° - 85°	Alcance: 1 m Azimuth: 1 m Precisión de altura: 1.5 m	CV-580, Aerotransportado	0.5 - 7.6 km	N/A	N/A	3 - 7 horas por vuelo	Según requerimiento
IFSARE	X (9.6 GHz)	HH, VV, HV, VH	5 - 16 km (10 km normalmente)	30° - 60° (45° normalmente)	Alcance: 3 m Azimuth: 3 m Precisión de altura: 1 - 3 m	Learjet 36, Aerotransportado	6.1 - 12.2 km	N/A	N/A	3 horas por 5 horas de misión	Según requerimiento
P-3/SAR	L (1.28 GHz) C (5.3 GHz) X (9.35 GHz) UWB(350 MHz)	HH, VV, HV, VH	4.9 - 9.8 km	20° - 70°	Alcance: 1.5 o 3 m	P-3A Orion, Aerotransportado	5, 10, 20 kft	N/A	N/A	7 - 10 horas	Según requerimiento
C/X-SAR	C (5.30 GHz) X (9.25 GHz)	HH, VV, HV, VH, Polarimétrica	18 - 65 km	0° - 74°	Alcance: 6 - 20 m Azimuth: 6 - 10 m	CV-580, Aerotransportado	6.5 km	N/A	N/A	5 horas de tiempo de vuelo	Según requerimiento
STAR-1	X (9.4 GHz)	HH	Modo 1: 24 km Modo 2: 48 km	55° - 85°	Modo 1: Alcance: 8 m Azimuth: 6 m 7 vistas Modo 2: Alcance: 16 m Azimuth: 6 m 7 vistas	Cessna Conquest, Aerotransportado	9.5 km	N/A	N/A	6 horas por vuelo	Según requerimiento
STAR-2	X (9.4 GHz)	HH	Modo 1: 65 km x 2 Modo 2: 100 km x 2	60° - 85°	Modo 1: Alcance: 15 m Azimuth: 15 m > 10 vistas Modo 2: Alcance: 25 m Azimuth: 25 m > 20 vistas	Challenger 600, Aerotransportado	12 km	N/A	N/A	6 horas por vuelo	Según requerimiento
ALMAZ-1	S (3.125 GHz)	HH	25 km	30° - 55°	Alcance: 15 - 30 m Azimuth: 15 m	Satélite	270 - 380 km	N/A	73°	Fuera de servicio	5 - 7 días
ERS-1	C (5.3 GHz)	VV	100 km	19.35° - 26.5°	Alcance: < 33 m Azimuth: < 30 m	Satélite	785 km	Polar, Sincronizada con el sol	98.5°	12 minutos por órbita	35 días
JERS-1	L (1.275 GHz)	HH	75 km	38.5°	Alcance: 18 m Azimuth: 18 m	Satélite	568 km	Polar, Sincronizada con el sol	97.7°	20 minutos por 96 minutos de órbita	44 días
RADARSAT	C (5.3 GHz)	HH	45 - 500 km (depende del modo de operación)	10° - 60° (depende del modo de operación)	Alcance: 11 - 100 m Azimuth: 9 - 100 m	Satélite	798 km	Circular, Sincronizada con el sol	98.6°	28 minutos por 100 minutos de órbita	24 días
SIR-C	L (1.28 GHz) C (5.3 GHz)	HH, VV, HV, VH	15 - 90 km	17° - 63°	Alcance: 8 - 30 m Azimuth: 30 m	Transbordador espacial	225 km	Órbita terrestre baja	57°	50 horas por vuelo	N/A
X-SAR	X (9.6 GHz)	VV	15 - 40 km	17° - 63°	Alcance: 30 m Azimuth: 30 m	Transbordador espacial	225 km	Órbita terrestre baja	57°	50 horas por vuelo	N/A

En este proyecto, para la correlación de los datos obtenidos de estimación de biomasa, mediante información estructural del árbol (i.e. DAP), y datos a través de DHP y TRAC, se ha utilizado dos sensores de adquisición de datos Radar, estos son: ALOS-PALSAR y RADARSAT-2, ambos operando con polarizaciones completas o Quadpol.

3.4.1. Imágenes radar del Satélite ALOS - PALSAR.-

El satélite avanzado de observación terrestre (ALOS), fue lanzado el 24 de enero de 2005, proyecto que se desarrolló en colaboración entre la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) y la Organización Japonesa de Sistemas para la Observación de Recursos (JAROS), siendo el mayor satélite desarrollado por Japón, ALOS cuenta con tres instrumentos de teledetección: Instrumento de mapeo estéreo con sensor remoto pancromático (PRISM) para la cartografía digital de elevación con una resolución de 2,5 metros, un radiómetro avanzado tipo 2 en rango visible e infrarrojo cercano (AVNIR-

2) para la observación precisa de la cobertura del suelo, Radar de Apertura Sintética de colección de fases de banda L (PALSAR) encargado de permitir la observación de la tierra durante todo el tiempo (European Space Agency, 2007), a continuación se presenta las especificaciones técnicas para ALOS.

Tabla 3.3 Especificaciones técnicas ALOS (tomado de: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm)

CARACTERISTICAS SENSOR ALOS	
Fecha de lanzamiento	Enero 24, 2006
Vehículo de lanzamiento	H-IIA
Sitio de lanzamiento	Centro Espacial Tanegashima
Peso de plataforma	Aprox. 4 ton
Energía generada	Aprox. 7 kW (hasta fin de operación)
Tiempo de vida	3 -5 años Sincronizado con el sol, sub recurrente Ciclo de repetición: 46 días
Órbita	Sub ciclo: 2 días Altitud: 691.65 km (desde el Ecuador) Inclinación: 98.16°
Determinación de la precisión de actitud	$2.0 \times 10^{-4}^{\circ}$ (with GCP)
Determinación de la precisión de posición	1m (fuera de línea)
Transferencia de datos	240Mbps (via relevo de datos en tecnología satelital) 120Mbps (Transmisión directa)
Memoria de datos en plataforma	Disco sólido (90Gbytes)

La plataforma ALOS tiene por objetivos:

- Proporcionar mapas de Japón y otros países, entre ellos la cartografía de la región de Asia-Pacífico;
- Llevar a cabo una observación regional de "desarrollo sostenible", brindando una armonización entre el medio ambiente y el desarrollo de la Tierra;
- Llevar a cabo un monitoreo de desastres naturales;
- Explorar recursos naturales, y su topografía;
- Desarrollo tecnológico para observación terrestre mediante satélites.



El Radar de Apertura Sintética por fases de banda L (PALSAR) es un sensor de microondas activo que utiliza frecuencias de banda L, que permite la observación de la tierra ya sea de día o de noche, penetrando nubes, niebla o lluvia. Tiene un modo de observación ScanSAR, el que permite adquirir imágenes con ancho de 250 a 350 km, en la siguiente tabla se describe las características del sistema.

Tabla 3.4 Características técnicas PALSAR (tomado de: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>)

CARACTERÍSTICAS SISTEMA PALSAR				
Modo	Fino		ScanSAR	Polarimetría experimental (modo 1)*
Centro de frecuencia	1270 MHz(L-band)			
Ancho de banda del eco	28 MHz	14 MHz	14 MHz, 28 MHz	14 MHz
Polarización	HH o VV	HH+HV o VV+VH	HH o VV	HH+HV+VH+VV
Ángulo incidente	8° - 60°	8° - 60°	18° - 43°	8° - 30°
Alcance	7 - 44 m	14 - 88 m	100 m (multi look)	24 - 89 m
Franja de observación	40 - 70 km	40 - 70 km	250 - 350 km	20 - 65 km
Longitud de Bit	5 bits	5 bits	5 bits	3 o 5bits
Velocidad de datos	240 Mbps	240 Mbps	120 Mbps, 240 Mbps	240 Mbps
NE sigma zero **	< -23 dB (ancho de franja 70 km) < -25dB (ancho de franja 60 km)	< -	< -25 dB	< -29 dB
S/A **,***	> 16dB (ancho de franja 70 km) > 21dB (ancho de franja 60 km)	>	> 21 dB	> 19 dB
Precisión radiométrica	Escena: 1 dB / órbita: 1.5 dB			

El sistema PALSAR no puede observar las zonas más allá de 87,8 grados de latitud norte y 75,9 grados de latitud sur, cuando, el ángulo fuera del nadir es de 41,5 grados.

* Debido al consumo de energía, el tiempo de operación será limitado.

** Válido para el ángulo fuera del nadir de 34,3 grados. (Modo Fina), 34,1 grados. (Modo ScanSAR), 21,5 grados. (Modo Polarimétrico).

*** S / A nivel puede deteriorarse debido a los cambios de ingeniería en PALSAR.

Existe varios productos que proporciona PALSAR estos se describen en la siguiente tabla:

Tabla 3.5 Productos PALSAR (European Space Agency, 2007)

Nivel de Procesamiento	Definición
1.0	<ul style="list-style-type: none"> Los datos del área de la escena 1 se extraen de los datos recibidos. El número de archivos de datos de SAR es el mismo que el número de polarizaciones en el caso de modos de polarización y de polarimetría duales. Los datos en modo SCAN SAR no se divide en exploraciones individuales. Esto corresponde a los productos de datos en bruto listo para ser procesado en un único complejo aspecto (L1.1) o imágenes de precisión (L1.5). Tipo de datos: 8 bits (I) + 8 bits (Q)
1.1	<ul style="list-style-type: none"> Simple vista de productos complejos (SLC). Provee una geometría inclinada. Conservación de productos de fase. Espaciado natural de píxeles Tipo de datos: 32 bits (I “in-phase”) + 32 bits (Q “quadrature”)
1.5	<ul style="list-style-type: none"> Productos detectados. Provee una geometría sobre el terreno. Varias vistas en alcance y azimut. Se puede seleccionar un modo fino para el espaciado de píxeles. Las latitudes y longitudes en el producto se calculan sin tener en cuenta la altura del terreno pero en base a GRS80 elipsoide. 16 bits de un número entero sin signo

El sistema PALSAR originalmente constaba de 132 opciones de modos de funcionamiento, pero las necesidades científicas, aspectos de programación, diversas solicitudes de usuarios, y las limitaciones operacionales del satélite, permitieron que se predeterminen seis modos de funcionamiento (Véase Tabla 3.6), cuatro operativas y dos semi-operacionales (Rosenqvist, Shimada, & Watanabe, 2004).

Tabla 3.6 Modos de funcionamiento PALSAR (tomado de: Rosenqvist et al., 2004)

Polarización	Ángulo fuera del nadir (franja, resolución)	Pasada	Comentario
HH	41.5° (70 km, 10 m)	Ascendente	Operacional
HH + HV	41.5° (70 km, 20 m)	Ascendente	Operacional
HH+HV+VH+VV	21.5° (30 km, aprox. 30 m)	Ascendente	Operacional
ScanSAR (HH)	5 - modo haz (350 km, aprox. 100 m)	Descendente	Operacional
HH	34.3° (70 km, 10 m)	Descendente	Solo adquisiciones limitadas
HH	21.5° (70 km, 10 m)	Descendente	Solo adquisiciones limitadas

La imagen adquirida para el presente proyecto, es una ALOS PALSAR -1, adquirida el 01 de junio de 2007, de pasada ascendente, con un nivel de procesamiento 1.1 y un ángulo de incidencia θ_0 de 23.89, en la Figura 3.8 se observa el área de cobertura y en la Figura 3.9 una combinación de Pauli de clasificación

de cobertura terrestre mediante segmentación del espacio, únicamente a manera de visualización, ya que la imagen aún no tiene ningún proceso de corrección, radiométrica y geométrica.



Figura 3.8 Área de cobertura de Imagen ALOS-P1_1_A-ORBIT__ALPSRP072040800

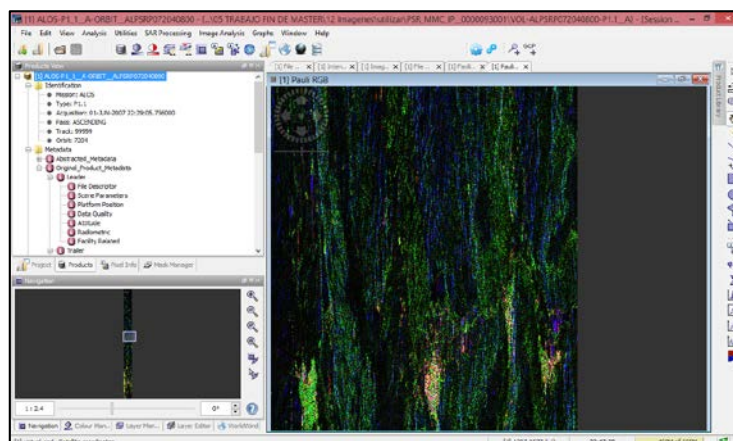


Figura 3.9 Combinación de Pauli para imagen ALOS-P1_1_A-ORBIT__ALPSRP072040800

3.4.2. Imágenes radar del Satélite RADARSAT-2.-

El satélite RADARSAT-2 fue lanzado en diciembre de 2007, siendo la siguiente generación de satélites comerciales radar de Canadá, este satélite ofrece potentes avances técnicos que mejoran la vigilancias marítima, del hielo, ambiental, la gestión de desastres y de recursos, así como proporciona herramientas para la cartografía de Canadá y del resto del mundo (<http://www.asc-sca.gc.ca/eng/satellites/radarsat2/default.asp>).

RADARSAT-2, fue construido en colaboración entre MacDonald, Dettwiler and Associates (MDA), y la Agencia Canadiense Espacial (CSA). Su desarrollo se basa en la herencia del satélite SAR RADARSAT-1, que fue lanzado en 1995. Este nuevo satélite lleva un único sensor SAR polarimétrico que

opera en la banda C (5.405 GHz). RADARSAT-2 mantiene la misma capacidad que el RADARSAT-1, manteniendo los mismos modos de imagen, de igual forma, los parámetros orbitales, permitiendo un co-registro de imágenes entre los dos sistemas RADARSAT-1 y RADARSAT-2. Además, las calibraciones radiométrica y geométrica se mantienen lo que permite la correlación de datos en series de tiempo, útiles para ciertas aplicaciones, como la detección de cambios a largo plazo. El sistema satelital RADARSAT-2 presenta las siguientes características:

- Modos de polarización: Tres modos de polarización: selectivo, Polarimétrico, Selección simple;
- Resolución: 3 m en modo ultra fino y 10 m en modo multi-look fino;
- Programación de tiempo de espera: La programación se define como el tiempo mínimo entre la recepción de la solicitud para programar el satélite y la adquisición de la imagen, la planificación para la adquisición de imágenes de rutina tiene un margen entre 12 y 24 horas, y planificación para la adquisición de imágenes de emergencia pueden estar entre 4, y 12 horas;
- Procesamiento: El procesamiento de rutina es de 4 horas; El procesamiento de emergencia es de 3 horas; El procesamiento de una sola escena es de 20 minutos;
- Re-visita: La re-visita se define como la capacidad del satélite de adquirir una imagen de la misma región geográfica. La re-visita se mejora a través de la capacidad de realizar tomas izquierdas y derechas;
- Georreferenciación: Conocimiento de la ubicación de la imagen siendo < 300 m al momento de la descarga de la imagen y < 100 m en post-procesamiento (Staples, 2005).

RADARSAT-2, lleva un haz de radar dirigible, tiene polarizaciones HH, HV y VV. Cubre franjas de barrido que varían de 20 km en modo Ultra fino a 500 km en modo ScanSAR y las resoluciones varían entre 3 a 100 metros. RADARSAT-1 y Radarsat-2 pueden capturar imágenes tanto en modo descendente durante el día local y ascendente durante la noche local, en la Figura 3.10 se describe todos los modos de haz que emite el RADARSAT-2. (<http://www.geoimage.com.au/satellite/radarsat>).

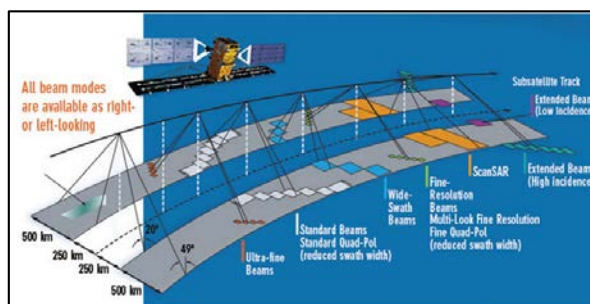


Figura 3.10 Tipos de haz emitidos por satélite RADARSAT-2 (tomado de: Agencia espacial Canadiense –CSA-)



En la siguiente Tabla 3.7 se describe las características técnicas en forma general, así como las características del RADAR y de la órbita de los sistemas RADARSAT-1 y RADARSAT-2, finalizando con la Tabla 3.8 que indica las características de los diferentes modos de haz para RADARSAT-2.

Tabla 3.7 Especificaciones técnicas sistemas RADARSAT-1 y RADARSAT-2 (tomado de: Agencia espacial Canadiense – CSA-)

	RADARSAT-1	RADARSAT-2
Alta Resolución	8 m X 8 m (modo stripmap)	1 m X 3 m (modo spotlight)
Peso total al lanzamiento	2,750 kg	2,200 kg
Tiempo estimado de vida útil de la misión	5 años	7 años
Dimensiones antena SAR	15 m x 1.5 m	15 m x 1.5 m
Dirección de vista	Vista derecha	Operación de rutina vista izquierda - derecha Aumento del tiempo de re-visita para una mayor eficiencia de monitoreo
RADAR		
Antena Activa	Banda C	Banda C
Centro de Frecuencia	5.3 GHz	5.405 GHz
Ancho de Banda	30 MHz	100 MHz
Polarización	HH	HH, VV, HV, VH
Aislamiento de Polarización	> 20 dB	> 25 dB
Longitud de apertura	15 m	15 m
Ancho de Apertura	1.5 m	1.37 m
Peso	679 kg	750 kg
Mecanismo de despliegue	Estructura de Soporte Extensible (ESS)	Estructura de Soporte Extensible (ESS)
ORBITA		
Altitud	793-821 km	798 km
Inclinación	98,6°	98,6°
Duración de una órbita	100.7 min	100.7 min
Nodo Descendente	6 horas.	6 horas.
Nodo Ascendente	18 horas.	18 horas.
Sincronización solar	14 órbitas por día	14 órbitas por día

Tabla 3.8 Modo de haz para RADARSAT-2 (tomado de: Agencia espacial Canadiense –CSA–)

Modos de Haz	Ancho de franja de barrido nominal (km)	Resolución aproximada (m) [Rango en el suelo por azimut]
Polarización selectiva		
Transmisión H o V recepción H y/o V		
Fino	50	10 x 9
Standard	100	25 x 28
Baja Incidencia	170	40 x 28
Alta Incidencia	75	20 x 28
Ancho	150	25 x 28
ScanSAR estrecho	300	50 x 50
ScanSAR ancho	500	100 x 100
Polarimetría		
Transmisión H y V o Pulsos alternativos / Recepción H y V o cualquier pulso		
Quad-pol Fino	25	11 x 9
Quad-pol Standard	25	25 x 28
Simple polarización selectiva		
Transmisión H o V recepción H o V		
Ultra-Fine	20	3 x 3
Spotlight	18	3 x 1
Multi vistas fino	50	11 x 9

La segunda imagen radar adquirida para el desarrollo del presente proyecto es una RADARSAT-2, con fecha de adquisición 09 de octubre de 2008, tipo SLC, de pasada ascendente, con ángulo de incidencia cercano de 38.33° y lejano de 39.81° , en la Figura 3.11 se observa el área de cobertura.

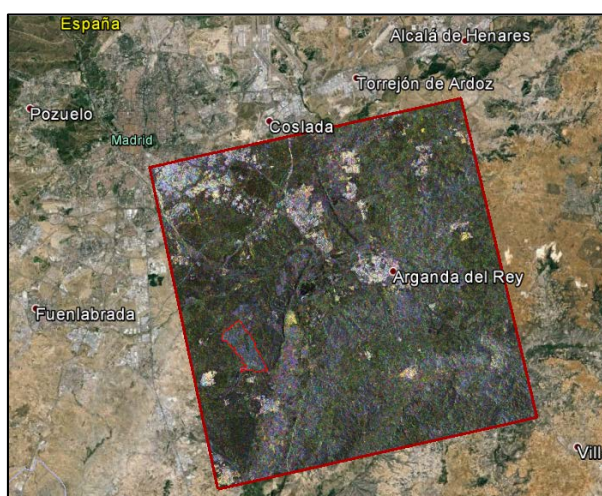


Figura 3.11 Área de cobertura de imagen RS2-SLC-FQ19-ASC-09-Oct-2008_18.12-PDS_00284020

3.5. PREPARACIÓN Y CORRECCIÓN DE IMÁGENES.-

Las imágenes SAR adquiridas, ya están dentro de un fichero de datos SLC, permitiendo una reducción en el tiempo de procesamiento, la corrección geométrica y radiométrica de las dos imágenes fueron realizadas en el software Sentinel Toolbox de distribución gratuita, desarrollado por contrato de la Agencia Espacial Europea (ESA).

3.5.1. Corrección geométrica y radiométrica.-

Debido a las variaciones topográficas de una escena y a la inclinación del sensor satélite, las distancias pueden ser distorsionadas en las imágenes SAR. Los datos de la imagen no contiene la ubicación del sensor del Nadir produciendo una cierta distorsión. Las correcciones del terreno están destinadas a compensar estas distorsiones, de modo que la representación geométrica de la imagen esté tan cerca como sea posible a la realidad. En la siguiente figura se muestra la geometría de las distorsiones topográficas en las imágenes SAR.

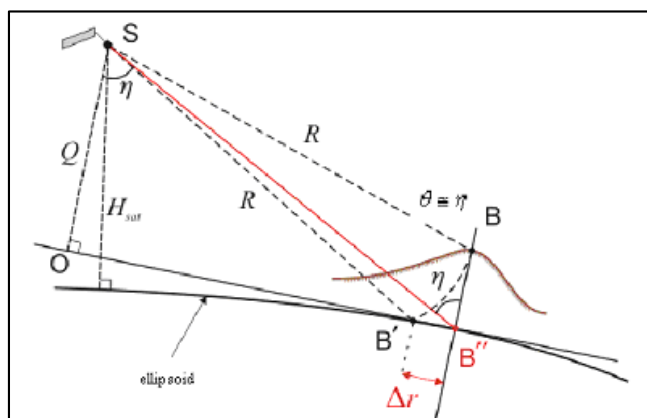


Figura 3.12 Geometría de las distorsiones topográficas (tomado de: ESA, Sentinels Application Platform)

En la Figura 3.12 se puede observar que el punto **B** con elevación **h** que se encuentra por encima del elipsoide, está reflejado en la posición **B'** en la imagen SAR, aunque su posición real es **B''**. El desplazamiento Δr entre **B'** y **B''** presenta el efecto de las distorsiones topográficas. Para la corrección geométrica de las imágenes SAR se ha utilizado el algoritmo de Ortorrectificación de Corrección Rango Doppler para Terreno, el mismo que implementa el método ortorrectificación de Rango Doppler (Schubert & Small, 2008) para geocodificación de imágenes SAR de geometría radar raster 2D. Utiliza la información del vector de estado de la órbita disponible en los metadatos u órbita precisa externa, también utiliza las anotaciones temporales del radar, la inclinación a la tierra, los parámetros de conversión gama junto con los datos del modelo de elevación digital (DEM), los que sirven de referencia para derivar la información precisa de la geolocalización (ESA, Sentinels Application Platform).

Mientras que la corrección radiométrica implementa una normalización radiométrica basada en el enfoque propuesto por Kelndorfer et al. (1998), en la que describe la siguiente expresión:

$$\sigma_{NORM}^0 = \sigma_{ELIPSOIDE}^0 \frac{\sin \theta_{DEM}}{\sin \theta_{ELIPSOIDE}} \quad [21]$$

Dónde θ_{DEM} es el ángulo de incidencia local proyectado en el plano gama y se define como el ángulo entre el vector de la radiación incidente y el vector normal a la superficie proyectada en el rango del plano. El plano gama es el plano formado por la posición del satélite, la posición del elemento observado y el centro de la tierra.

Se debe tener en cuenta que las bandas σ^0 , γ^0 y β^0 son salida del producto, únicamente σ^0 es una banda verdadera mientras que γ^0 y β^0 son bandas virtuales expresadas en términos de σ^0 y el ángulo de incidencia. Por lo tanto, σ^0 y el ángulo de incidencia se guardan automáticamente y las bandas γ^0 o β^0 son seleccionadas. En el cálculo de σ^0 y γ^0 , toma por defecto la opción del ángulo de incidencia proyectado del Modelo digital de elevaciones, sin embargo la opción del ángulo de incidencia de la corrección del elipsoide es una opción de la que se puede disponer, σ^0 representa la retrodifusión radar.

La plataforma Sentinel Toolbox, permite al usuario seleccionar un tamaño de píxel apropiado, para la salida de la imagen ortorectificada, considerando la finalidad del proyecto, además del tamaño o la separación de píxeles predeterminado, el cual, se basa en los parámetros de los metadatos.

El tamaño del píxel o separación del píxel, se puede introducir tanto en metros como en grados. Los cálculos de la separación de píxeles en metros y en grados están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$EP_g = EP_m / R_E * 180 / \pi \quad [22]$$

$$EP_m = EP_g * R_p * \pi / 180 \quad [23]$$

Donde EP_g es el espaciado de píxeles en grados, EP_m representa el espaciado de píxeles en metros, R_E es el radio de la Tierra en el Ecuador = 6378137.0 m y R_p es el radio de la Tierra en el Polo = 6356752.314245 m tal como se da para el sistema WGS84, las imágenes resultado son sometidas a un control de la georreferenciación para lo que se utiliza las ortofotos de la PNOA.



3.6. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA.-

3.6.1. Modelización mediante medidas del árbol (uso de ecuaciones alométricas).-

La estimación de biomasa mediante la adquisición de medidas de la estructura del árbol (i.e. DAP), se realiza mediante el uso de las ecuaciones [5] y [6], utilizadas por varios investigadores, en base a estas expresiones los autores López Ochoa (2012); Montero et al. (2005) proponen el uso de las siguientes ecuaciones:

$$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(x_i) \quad [24]$$

$$y_i = \beta_0 \cdot x_i^{\beta_1} \quad [25]$$

Dónde: β_0 y β_1 son parámetros de regresión, “ y_i ” es biomasa del componente (kg) y “ x_i ” es diámetro normal (cm). De estas ecuaciones se utiliza la ecuación en su expresión logarítmica, ecuación utilizada en el trabajo realizado por Montero et al. (2005), que detalla la estimación de biomasa y fijación de carbono para los bosques de España, de tal manera que permite una aplicación de este método con los datos que se puedan obtener del Inventario Nacional Forestal, o de información adquirida en campo de acuerdo al tipo de especie forestal a estudiar, en este caso *Pinus halepensis* Mill.. Dado que en el presente estudio no se realiza ningún tipo de análisis destructivo se toma los coeficientes de regresión para β_0 , β_1 obtenidos para biomasa del fuste y de biomasa aérea total del estudio realizado por Montero et al. (2005), estos valores son los siguientes:

Parámetros para biomasa del fuste

- $\beta_0 = -2.51839$;
- $\beta_1 = 2.13609$.

Parámetros para biomasa aérea total

- $\beta_0 = -2.0939$;
- $\beta_1 = 2.20988$.

La ecuación [24] simplifica los cálculos, y además, en la mayoría de los casos incrementa la bondad del análisis estadístico. Sin embargo, la transformación logarítmica introduce un sesgo (subestimación) en los cálculos. Para la eliminación de este sesgo, el resultado final es multiplicado por un factor de corrección (CF), este valor se toma de igual manera del estudio de Montero et al (2005), a partir del error estándar de estimación (SEE) determinado para la especie forestal en estudio. Este valor del coeficiente de corrección es calculado según la siguiente expresión:

$$CF = e^{SEE^2/2} \quad [26]$$

SEE para biomasa del fuste

- $SEE = 0.231322$

SEE para biomasa aérea total

- $SEE = 0.151637$

La adquisición de las medidas del árbol se registran en hojas de campo (Véase Anexo 3), posteriormente estas ingresan en una hoja de cálculo donde se realizan los cálculos de determinación de biomasa (Véase Anexo 4), para un total de 400 muestras repartidas en 20 parcelas. Típicamente la biomasa se reporta por unidad de hectárea, por lo que la relación de biomasa de la parcela de muestreo y una parcela de una hectárea se realiza mediante la siguiente expresión:

$$BSS_{ha} = (A_{ha} / A_p) * BSS_p \quad [27]$$

Dónde BSS_{ha} es la estimación de biomasa por unidad de hectárea, A_{ha} representa el valor de una hectárea (i.e. 10.000 m²), A_p es el área de la parcela muestreada, y BSS_p es la estimación de biomasa a nivel de parcela muestreada en toneladas métricas.

El cálculo de CO₂ que podría ser emitido a la atmósfera si los árboles de cada parcela llegan a ser taladas, o quemadas se puede estimar mediante la siguiente expresión (W. Walker et al., 2011):

$$CO_2 = BSS * (PM_{CO_2} / PM_C) \quad [28]$$

Dónde CO₂ representa la cantidad de dióxido de carbono que podría ser emitido a la atmósfera, BSS es la estimación de biomasa calculada, PM_{CO_2} es el peso molecular del dióxido de carbono y PM_C el peso molecular del carbono.

El contenido de carbono en relación a la biomasa para este estudio es de 49.9% de acuerdo a la publicación de Montero et al. (2005).



3.6.2. Modelización mediante medidas DHP y TRAC.-

3.6.2.1. Procesamiento de datos TRAC.-

La obtención del LAI efectivo mediante el uso de medidas TRAC, se realiza mediante el equipo TRAC y la herramienta TRACWIN, para lo que se sigue el protocolo de adquisición y procesamiento de la información detallados en Leblanc et al. (2002), el primer dato que se calculan es el gap fraction, para lo que se utiliza la siguiente expresión:

$$P(\theta) = \frac{R_{mean} - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \quad [29]$$

Donde Rmean es el valor de la media de la densidad del flujo de fotones fotosintéticos (PPFD), Rmin es la PPFD mínima de un segmento, y Rmax es el valor máximo de PPFD (por encima del dosel PPFD) leídos en un segmento. La gap fraction del transecto es el valor de la media de un segmento individual. El valor mínimo de PPFD se encuentra en el pico del histograma para una PPFD menor de ¼ de la máxima PPFD. Para mejorar la estimación de del gap fraction, TRACWin calcula el promedio de las lecturas de valores menores para Rmin a Rmin y el valor más grande para Rmax a Rmax.

Como se indicó en 2.3.2.1, los valores que obtienen los sensores pasivos es el PAI que se utiliza para convertir en el LAI efectivo, el cual es el producto del LAI y del índice de agrupamiento del follaje (E. García, Lledó, & Sánchez, 2013), para lo que es necesario la ubicación (longitud y latitud) del área de muestreo y la longitud de referencia de la zona horaria. El índice de área foliar (LAI) para coníferas está definido como la mitad del área de la superficie de las acículas por unidad de área de superficie de suelo (García et al., 2013), permitiendo la separación de los componentes del follaje en acículas y ramas, siendo las acículas las que determinan el LAI.

La información del LAI efectivo que se obtiene mediante el TRAC o DHP, debe someterse a una corrección de lecturas, multiplicando este resultado por un coeficiente, este valor se puede calcular de acuerdo a la siguiente expresión:

$$LAI = (1 - \alpha) LAI_{efec} \left(\frac{\gamma_E}{\Omega_E} \right) \quad [30]$$

Dónde:

α = Parte leñosa (razón entre el área de la superficie leñosa y el área de la superficie total);

LAI_{efec} = Índice de área obtenido con técnicas ópticas (v.g. TRAC, DHP);

γ_E = Razón de área de acículas a ramillo;

Ω = Índice de agrupamiento para escalas superiores a las del ramillo.

La estimación de biomasa, a partir de los datos del LAI, obtenido por técnicas DHP y TRAC se relaciona a través de la ecuación de estimación de biomasa en su expresión logarítmica [6], y utilizada en el estudio desarrollado por Lopez Serrano et al. (1997), relacionando el DAP obtenido de las medidas del árbol, y los registros obtenidos del LAI por las dos metodologías aquí modelizadas. Esta información pertenece a cada una de las parcelas definidas en el ítem 3.2. Para este estudio, se determina los coeficientes del modelo, de acuerdo al trabajo realizado por Lopez Serrano et al. (1997), quien ha realizado un estudio comparativo con técnicas de obtención del LAI directo e indirecto, incluyendo unas relaciones muy significativas para parámetros dendométricos como la biomasa del tronco o total, siendo utilizados para este estudio los siguientes coeficientes:

Los parámetros para biomasa total

- $\beta_0 = -3.95$;
- $\beta_1 = 0.36$;
- $\beta_2 = 3.07$.

Los parámetros para biomasa del tronco

- $\beta_0 = -3.39$;
- $\beta_1 = 0.42$;
- $\beta_2 = 2.97$.

La expresión en su forma logarítmica para las dos técnicas aquí utilizadas queda expresada de la siguiente manera:

$$\log(BAT) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(LAI) + \beta_2 \cdot \log(DAP) \quad [31]$$

3.6.2.2. Procesamiento de datos DHP.-

La obtención del LAI a partir de fotografías digitales hemisféricas se realiza siguiendo el protocolo propuesto por Weiss & Baret (2014), si bien en el presente estudio se realiza un levantamiento de información para adquisición del índice de área foliar por medio de fotografías hemisféricas, este resultado solo es una presentación alternativa para la determinación del LAI, puesto que solo se toma datos en una parcela de prueba.



El programa utilizado es CAN-EYE de distribución gratuita, y desarrollado por EMMAH laboratoty (Mediterranean environment and agro-hydro system modelisation) del Instituto Nacional Francés de Investigación Agrícola (INRA).

Las imágenes adquiridas se obtienen con una cámara no métrica CANON EOS 450D y un lente gran angular u ojo de pez. Esta metodología como ya se ha descrito con anterioridad, obtiene el LAI mediante la aplicación de la teoría de huecos.

Es importante recordar que los resultados que se obtiene a partir de la teoría de fracción de huecos es la obtención del PAI ya que las mediciones indirectas solo permiten evaluar el índice de área de la planta, ya que no es posible saber si algunas hojas están presentes detrás de las ramas o del tronco.

3.6.3. Modelización mediante datos de microondas.-

El presente modelo sigue la propuesta realizada por Saatchi et al. (2007), para lo que se utilizan las ecuaciones [17] y [18], obteniendo una estimación de la biomasa en la copa y el fuste, respectivamente, determinando el uso de la imagen ALOS-PALSAR para la ecuación [18] y la imagen RADARSAT-2 en la ecuación [17], ya que se ha podido observar a través de varias investigaciones, un estrecha relación de la banda L, con la estimación de la biomasa de la madera o del fuste, y la banda C, con la estimación de biomasa foliar o de la copa.

El primer paso para el desarrollo de esta metodología, es el establecimiento de los coeficientes presentes en las ecuaciones [17] y [18], siendo estos a_0 , a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 y c_2 , para los correspondientes W_c (estimación de biomasa foliar) y W_s (estimación de biomasa del fuste). Los coeficientes se obtienen a partir de un ajuste de mínimos cuadrados al polinomio de segundo grado, para lo cual se correlaciona los datos DHP y TRAC para W_c , y de la alometría para W_s . Dentro del área de estudio se han seleccionado 400 muestras en 20 parcelas de análisis (Véase ítem 3.3), estas áreas fueron seleccionadas a partir de una malla de 100 x 100 metros, lo que corresponde a un conjunto de 5 x 5 píxeles para la imagen del satélite ALOS-PALSAR, y un conjunto de 10 x 10 píxeles para la imagen RADARSAT-2. Las imágenes son sometidas a un filtro reductor de speckle, y se realiza un resample a un tamaño de pixel de 100 x 100 m, permitiendo obtener los valores de retrodifusión en las parcelas de muestreo, a fin de relacionar esta información con los datos obtenidos de las medidas de campo, y por técnicas DHP y TRAC. A partir de la obtención de los coeficientes se genera una nueva banda en las imágenes correspondientes a cada satélite, con la aplicación de las ecuaciones [17] y [18], permitiendo obtener la estimación de biomasa foliar y del fuste mediante el uso de imágenes radar.



CAPITULO IV RESULTADOS

4.1.APLICACIÓN DE METODOLOGÍA Y RESULTADOS.-

4.1.1. Metodología mediante medidas del árbol (uso de ecuaciones alométricas).-

Para la toma de datos de las medidas del árbol, se ha utilizado un GPS navegador para ubicar las coordenadas de las áreas de muestreo obtenidas de acuerdo a ítem 3.2.2, a partir de estas, mediante el uso de una brújula se delimita las líneas en dirección de los puntos cardinales sobre las cuales se toman los datos del DAP de acuerdo al numeral 3.3.1, este proceso se lo realiza en cada una de las parcelas, llenando sus respectivas hojas de campo y adquiriendo las respectivas fotografías del sitio.

La información adquirida del DAP es tabulada en hojas de cálculo por cada parcela de estudio, a fin de obtener los resultados de estimación de biomasa del fuste y aérea en toneladas métricas de acuerdo a lo detallado en el ítem 3.6.1, para esto es necesario aplicar las ecuaciones [24] y [26] , detalladas en las tablas de cada parcela que se encuentran en el Anexo 4.

En la siguiente tabla se detalla un resumen de los resultados obtenidos de estimación de biomasa del fuste, biomasa aérea total, valores estimados por hectárea, así como los resultados de fijación de carbono.



Tabla 4.1 Estimación de biomasa y fijación de carbono con de metodologías convencionales

SITIOS DE MUESTREO	DAP PROMEDIO (CM)	BIOMASA DEL FUSTE PROMEDIO (tn/árbol)	BIOMASA AEREA TOTAL PROMEDIO (tn/árbol)	BIOMASA DEL FUSTE (tn/ha)	BIOMASA TOTAL AEREA (tn/ha)	Contenido de Carbono en el Fuste	Contenido de Carbono aéreo	CO2 fuste (tn/ha)	CO2 aérea (tn/ha)	BIOMASA TOTAL (fuste + BAT) tn/ha	CO2 TOTAL (tn/ha)
Parcela No.1	72.1	6.803	7.403	42.517	46.270	21.216	23.089	77.792	84.659	88.787	162.451
Parcela No.2	70.25	6.715	7.314	41.971	45.713	20.943	22.811	76.793	83.640	87.684	160.433
Parcela No.3	65.35	6.625	7.222	41.408	45.140	20.663	22.525	75.763	82.592	86.549	158.355
Parcela No.4	75	6.862	7.464	42.890	46.650	21.402	23.278	78.474	85.353	89.539	163.827
Parcela No.5	80.45	7.069	7.675	44.184	47.969	22.048	23.936	80.843	87.767	92.153	168.609
Parcela No.6	66.55	6.667	7.264	41.666	45.403	20.791	22.656	76.235	83.072	87.069	159.307
Parcela No.7	62	6.504	7.099	40.652	44.370	20.285	22.141	74.380	81.182	85.022	155.562
Parcela No.8	73.25	6.873	7.475	42.956	46.717	21.435	23.312	78.595	85.477	89.673	164.072
Parcela No.9	61.1	6.479	7.073	40.495	44.209	20.207	22.060	74.092	80.888	84.704	154.980
Parcela No.10	62.4	6.502	7.097	40.636	44.354	20.278	22.132	74.351	81.152	84.990	155.503
Parcela No.11	59.25	6.379	6.972	39.871	43.574	19.896	21.743	72.951	79.726	83.445	152.677
Parcela No.12	70.85	6.800	7.400	42.499	46.252	21.207	23.080	77.760	84.625	88.751	162.385
Parcela No.13	74.2	6.871	7.473	42.944	46.705	21.429	23.306	78.573	85.455	89.649	164.028
Parcela No.14	67.8	6.706	7.305	41.914	45.656	20.915	22.782	76.689	83.534	87.570	160.223
Parcela No.15	73.3	6.860	7.462	42.875	46.635	21.395	23.271	78.447	85.326	89.510	163.773
Parcela No.16	77.6	6.980	7.584	43.626	47.400	21.769	23.653	79.821	86.726	91.026	166.548
Parcela No.17	75.55	6.935	7.538	43.343	47.111	21.628	23.508	79.303	86.198	90.454	165.500
Parcela No.18	63.7	6.548	7.144	40.924	44.647	20.421	22.279	74.878	81.689	85.571	156.567
Parcela No.19	64.15	6.570	7.166	41.061	44.787	20.489	22.348	75.128	81.944	85.848	157.073
Parcela No.20	70.9	6.796	7.396	42.475	46.227	21.195	23.067	77.715	84.580	88.702	162.294

4.1.2. Metodología mediante DHP y TRAC.-

4.1.2.1. Desarrollo mediante datos TRAC.-

El procesamiento de los datos obtenidos con el equipo TRAC se lo realiza a través del uso de la herramienta TRACWIN, basando su ejecución en el manual descrito por Leblanc et al. (2002). Se debe tener en cuenta algunos parámetros característicos de cada bosque, tal como se detalla a continuación.

Estimar el ancho medio del elemento (Mean Element Width), siendo este, el tamaño promedio de las sombras proyectadas por el dosel, calculada a través de la siguiente expresión:

$$\overline{W} = \sqrt{G(\theta)A} \quad [32]$$

Donde \overline{W} es el tamaño promedio de la sombra proyectada, $G(\theta)=0.5$ siendo un valor válido para muchos casos de cultivos o de doseles naturales, especialmente si el ángulo cenital solar está cerca de 57.3° . (A) es el área foliar proyectada en un solo lado de la hoja. Para obtener este valor se puede digitalizar el contorno de una hoja, o bien estimar este dato, si la hoja es casi circular, se debe utilizar su diámetro (d) y considerar que fuese un disco ($A = \pi (d/2)^2$). Sin embargo para coníferas, se debe considerar como si las hojas fuesen un cilindro, $A = \pi (dL + 0.5d^2)/2$, donde (L) es la longitud del cilindro y (d) el diámetro. (Leblanc et al., 2002). Para el presente proyecto se considera un diámetro de la acícula de 0.85 mm y una longitud de 5.5 cm, estos valores son un promedio de los tamaños reportados por esta especie [Wikipedia].

Definir la relación del pulso emitido con el área de barrido (needle-to-shoot), siendo para hojas planas uno, para bosques de coníferas se necesita un valor de needle-to-shoot mayor a la unidad, con el fin de considerar la formación de grupos o conglomerados de escala menor que el área registrada por el equipo, existen ciertos valores típicos para algunas especies que se detallan en Leblanc et al. (2002) siendo estos:

- *Picea mariana*: 1.30-1.40;
- *Pinus Banksiana*: 1.20-1.40;
- *Pinus resinosa*: 2.08;
- *Pinus sylvestris*: 1.75;
- *Pseudotsuga menziesii*: 1.77.

Definir la relación de área total de madera, dado que el valor por defecto es cero lo que significa que no fue “visto” ningún material de madera por el TRAC, para lo que Leblanc et al. (2002) indica algunos valores típicos de acuerdo a la especie arbórea.

- *Picea mariana*: 0.12-0.17;
- *Pinus Banksiana*: 0.03-0.05;



- *Pinus Banksiana*: 0.11-0.34;
- *Pinus resinosa*: 0.07;
- *Pseudotsuga menziesii*: 0.08;
- *Populus tremuloides*: 0.21-0.22;
- *Oak-hickory*: 0.11;
- *Sitka spruce*: 0.23.

La especie analizada en el presente proyecto es un Pino carrasco (*Pinus Halepensis*) el mismo que tiene una sinonimia con el *Pinus sylvestris* y *Pinus resinosa*, de tal manera que se utilizan los parámetros para el Pino rojo (*Pinus resinosa*), para definir el needle-to-shoot y la relación del área total de madera.

Este proceso se lo realiza para cada una de las parcelas donde se realiza el levantamiento de la información con TRAC, considerando los valores máximos, mínimos o el promedio del PPFD para el análisis (Véase Figura 4.2), esto depende a las condiciones de la parcela, en la siguiente figura se describe el interfaz de la herramienta TRACWIN para el procesamiento de la información.

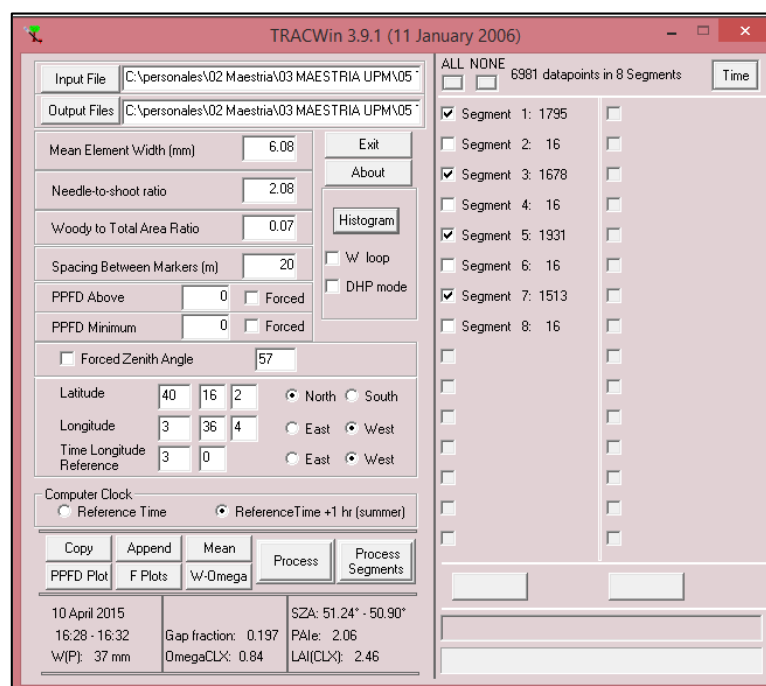


Figura 4.1 Interfaz para procesamiento de TRAC

La ecuación [30] proporciona el factor de corrección para estimar el LAI a partir del LAI efectivo, sin embargo para obtener este dato es requerimiento la obtención de otros parámetros que no han sido recopilados en este estudio, por lo tanto se ha decidido utilizar el coeficiente de corrección proporcionado por García (2005), el mismo que promedia los valores para pinos longevos tomando los valores de Ω de Chen et al. (1997), (Véase Tabla 4.2)

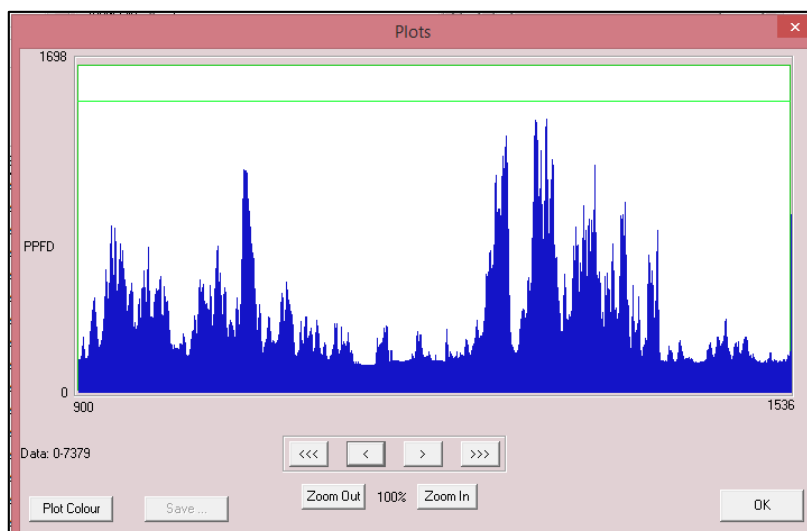


Figura 4.2 Histograma para PPFD

Tabla 4.2 Índices de corrección obtenidos en la copa de los árboles de dos especies de pinos (tomado de: García, 2005)

Especie	Código	Diámetro normal (m)	Altura de árbol	(1- α)	γ_E	Ω_E	Índice de corrección
Pinus Halepensis Miller	a	0.14	5.3	0.44	1.13	0.77	0.64
	b	0.18	6	0.57	0.92	0.77	0.68
	c	0.12	4	0.5	0.79	0.77	0.51
	AW	0.09	3.2	0.64	0.91	0.77	0.79
	AP	0.12	6	0.6	1.13	0.77	0.88
	AQL	0.14	6	0.79	0.84	0.77	0.86
	A48	0.17	5.1	0.67	1.01	0.77	0.88
Pinus pinea L.	A	0.14	5.2	0.65	0.84	0.77	0.71
	B	0.1	4.2	0.51	1.16	0.77	0.77
	C	0.15	5	0.57	0.95	0.77	0.7
	AOJ	0.14	5.3	0.71	0.97	0.77	0.89
	AN48	0.12	4.2	0.59	1.24	0.77	0.95
	A44	0.14	4.34	0.58	0.83	0.77	0.63
	A37	0.13	5.4	0.65	0.94	0.77	0.79

De acuerdo a los índices de corrección obtenidos en la Tabla 4.2, el valor a considerar para el presente estudio es 0.68 al ser el más semejante a la estructura de los árboles del proyecto. Este índice de corrección presenta una correlación significativa entre estudios de LAI indirecto y los obtenidos por forma semi-destructiva (García, 2005), de esta manera se obtiene el LAI por medios ópticos, el mismo que se utiliza en la ecuación [31] para la estimación de biomasa.

En este estudio se utilizó el DAP promedio por parcela, el mismo que es obtenido de las 20 muestras registradas por sector de análisis, de tal manera que el cálculo de la biomasa y fijación de carbono por hectárea se lo realiza en función de estas muestras y de la parcela analizada mediante técnica TRAC y DHP, en la siguiente tabla se presenta los resultados para estimación de biomasa y fijación de carbono mediante TRAC, el resultado del procesamiento TRAC se puede observar en el Anexo 5.



Tabla 4.3 Estimación de biomasa y fijación de carbono a través de metodología TRAC

Número de Parcela	DAP PROMEDIO (1.30m, >10 cm)	LAI efectivo (m ² /m ⁻²)	LAI corregido (m ² /m ⁻²)	ELB _F ueste	ELB _{BAT}	BIOMASA DEL FUSTE (tn/ha)	BIOMASA TOTAL AEREA (tn/ha)	Contenido de Carbono en el Fuste	Contenido de Carbono aéreo	CO ₂ fuste (tn/ha)	CO ₂ área (tn/ha)	BIOMASA TOTAL (fuste + BAT) tn/ha	CO ₂ TOTAL (tn/ha)
1	72.1	3.730	2.536	1.899	2.298	41.761	62.204	20.839	31.040	76.409	113.813	103.965	190.221
2	70.3	1.560	1.061	1.728	2.105	35.199	51.310	17.564	25.604	64.402	93.880	86.509	158.283
3	65.4	2.730	1.856	1.720	2.114	34.887	51.764	17.408	25.830	63.831	94.712	86.651	158.543
4	75.0	2.850	1.938	1.910	2.300	42.202	62.315	21.059	31.095	77.216	114.016	104.517	191.231
5	80.5	1.620	1.102	1.915	2.287	42.422	61.537	21.169	30.707	77.619	112.593	103.960	190.212
6	66.6	2.080	1.414	1.701	2.088	34.256	50.429	17.094	25.164	62.676	92.269	84.685	154.945
7	62.0	5.810	3.951	1.767	2.184	36.599	55.512	18.263	27.700	66.965	101.568	92.111	168.532
8	73.3	2.780	1.890	1.875	2.265	40.736	60.172	20.327	30.026	74.532	110.095	100.908	184.628
9	61.1	3.350	2.278	1.662	2.065	32.932	49.269	16.433	24.585	60.255	90.146	82.201	150.401
10	62.4	3.560	2.421	1.699	2.103	34.193	51.190	17.062	25.544	62.562	93.660	85.383	156.222
11	59.3	2.560	1.741	1.579	1.976	30.308	45.086	15.124	22.498	55.453	82.493	75.394	137.946
12	70.9	4.940	3.359	1.920	2.327	42.630	64.015	21.273	31.943	78.000	117.125	106.645	195.125
13	74.2	3.480	2.366	1.927	2.322	42.922	63.739	21.418	31.806	78.534	116.621	106.661	195.155
14	67.8	2.510	1.707	1.755	2.146	36.163	53.456	18.045	26.674	66.167	97.806	89.619	163.972
15	73.3	4.800	3.264	1.961	2.365	44.407	66.534	22.159	33.201	81.250	121.735	110.941	202.986
16	77.6	4.980	3.386	2.043	2.445	48.191	72.093	24.047	35.975	88.173	131.907	120.284	220.079
17	75.6	2.180	1.482	1.878	2.260	40.866	59.904	20.392	29.892	74.772	109.604	100.770	184.376
18	63.7	4.220	2.870	1.754	2.161	36.093	54.226	18.011	27.059	66.039	99.216	90.319	165.254
19	64.2	4.740	3.223	1.781	2.191	37.102	55.893	18.514	27.891	67.883	102.265	92.994	170.149
20	70.9	4.220	2.870	1.896	2.299	41.632	62.258	20.775	31.067	76.174	113.911	103.890	190.085

4.1.2.2. Desarrollo mediante datos DHP.-

Como alternativa a la obtención del LAI por métodos indirectos, se utiliza el procesamiento de fotografías hemisféricas digitales, a través del uso de una cámara fotográfica no métrica y un teleobjetivo gran angular u ojo de pez, se obtuvieron 12 fotografías hemisféricas en la parcela 11, de acuerdo al ítem 3.3.2. Posteriormente se procede con el ingreso de los parámetros de la cámara utilizada requeridos por el software CAN-EYE, obteniendo los siguientes resultados:

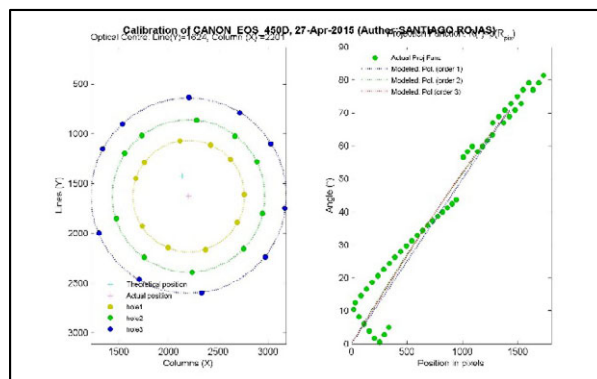


Figura 4.3 Calibración del centro óptico y función de proyección

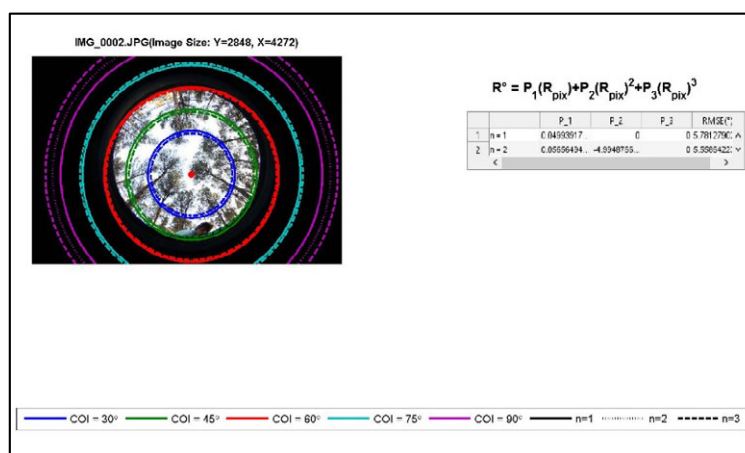


Figura 4.4 Resultado de calibración de cámara fotográfica

Tabla 4.4 Parámetros resultantes de calibración de cámara fotográfica

Centro óptico - Columnas	Centro óptico - Filas
1624	2201
Función de proyección	
Polinomio de 1er orden: $R(^{\circ})=0.04993918R(\text{pix})$	
Polinomio de 2do orden: $R(^{\circ})=-0.00000499R(\text{pix})^2 + 0.05656494R(\text{pix})$	
Polinomio de 3er orden: $R(^{\circ})=-0.00000000R(\text{pix})^3 + 0.00000179R(\text{pix})^2 + 0.05308230R(\text{pix})$	

Con los parámetros calibrados de la cámara se procede a seleccionar el conjunto de fotografías a procesar, y posteriormente a generar un enmascaramiento de toda la información no relevante en la fotografía para su análisis (Véase Figura 4.6), se puede utilizar una corrección gamma a fin de discriminar visualmente la vegetación de su entorno, para este proyecto se ha utilizado un factor de 1.23 tal como se muestra en la siguiente figura.

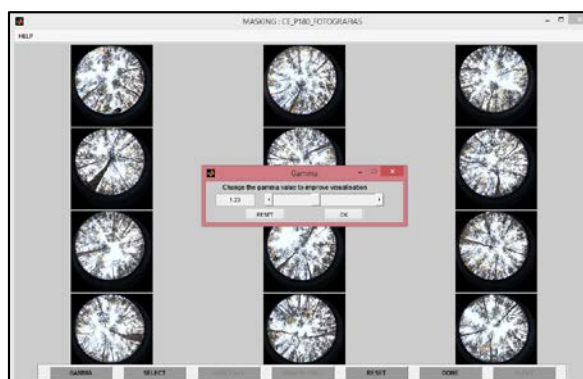


Figura 4.5 Corrección gamma para DHP

El proceso de enmascaramiento se lo realiza cada una de las fotografías que requieran este proceso tal como se muestra en la siguiente figura.

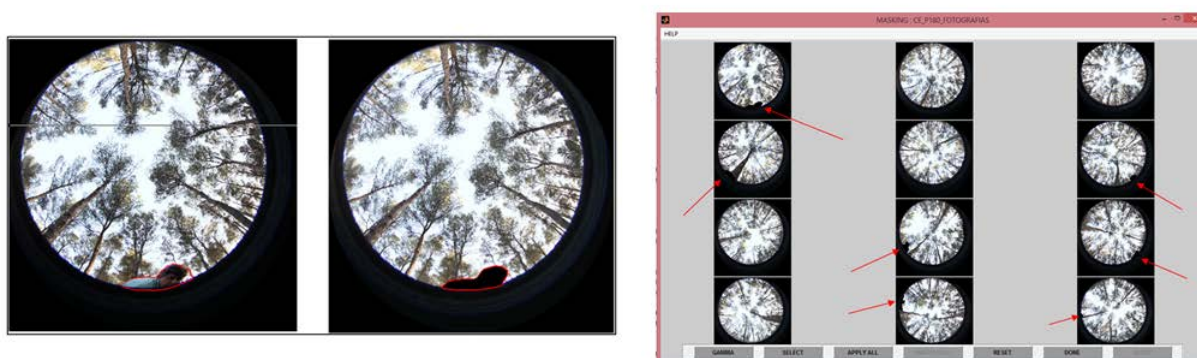


Figura 4.6 Enmascaramiento de información no relevante para DHP

Posterior al enmascaramiento se realiza una clasificación de la imagen. Dado que el desarrollo de esta metodología es un ejercicio de entrenamiento para la determinación del LAI a partir de DHP, se selecciona la opción de 2 clases sin píxeles mixtos, de tal manera que se considera las clases de “cielo” y “no cielo” (Véase Figura 4.7), obteniendo los siguientes resultados para PAI efectivo que se detallan en la Tabla 4.5.

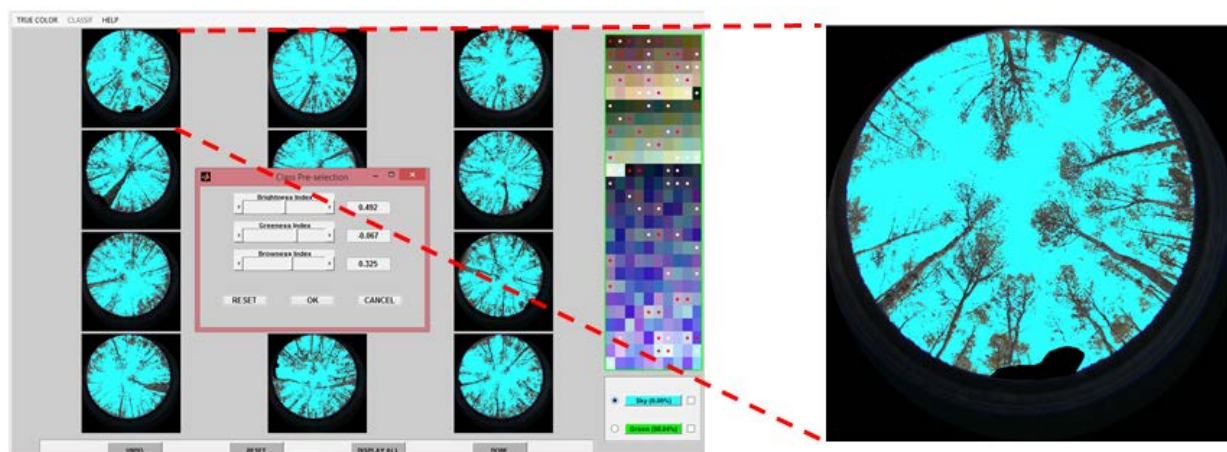


Figura 4.7 Clasificación de fotografías hemisféricas digitales

Tabla 4.5 Resultado mediante DHP

Variable		CEV6.1	CEV5.1	Miller	LAI2000 (3)	LAI2000 (4)	LAI2000 (5)
PAI	Efectivo	2.66	1.04	2.17	0.61	1.4	1.65
	Verdadero	4.92	2.32	5.22	-	-	-

El valor de PAI efectivo a considerar como LAI efectivo es de $2.66 \text{ m}^2/\text{m}^2$, dada la versión del software con el que se ha realizado el trabajo, La obtención del LAI corregido se obtiene al considerar el mismo índice de corrección explicado en el numeral 4.1.2.1, o la información del LAI2000 (5), con esto en la siguiente tabla se detalla la comparación del LAI corregido en la parcela 11 entre los valores de DHP y TRAC así como la estimación de biomasa y fijación de carbono.



Tabla 4.6 Estimación de biomasa y fijación de carbono a través de metodología DHP para parcela 11

Número de Parcela	Dato utilizado	DAP PROMEDIO (1.30m, >10 cm)	LAI efectivo (m ² /m ⁻²)	LAI corregido (m ² /m ⁻²)	ELB _{Fuste}	ELB _{BAT}	BIOMASA DEL FUSTE (tn/ha)	BIOMASA TOTAL AEREA (tn/ha)	Contenido de Carbono en el Fuste	Contenido de Carbono aéreo	CO ₂ fuste (tn/ha)	CO ₂ área (tn/ha)	BIOMASA TOTAL (fuste + BAT) tn/ha	CO ₂ TOTAL (tn/ha)
11	PAI - DHP	59.3	2.660	1.809	1.586	1.984	30.524	45.452	15.232	22.681	55.849	83.162	75.976	139.011
11	LAI - LAI2000(5)	59.3	2.660	1.650	1.572	1.967	30.089	44.697	15.014	22.304	55.053	81.780	74.785	136.832
11	TRAC	59.3	2.560	1.741	1.579	1.976	30.308	45.086	15.124	22.498	55.453	82.493	75.394	137.946

4.1.3. Metodología mediante datos de microondas.-

Para el desarrollo de las correcciones mencionadas, se utiliza un Modelo Digital del Terreno, con una resolución de 5m, adquirido mediante tecnología LiDAR, el cual que está disponible para su descarga a través de la página web del Instituto Geográfico Nacional de España. Mediante la opción de corrección geométrica y radiométrica que proporciona el módulo de Range Doppler Terrain Correction, se genera las respectivas correcciones (Véase Figura 4.8 y Figura 4.9), se elige un tamaño de píxel de 20 m para la imagen del satélite ALOS-PALSAR, a fin de relacionar el tamaño del píxel de la imagen ortorectificada con la toma de datos de las medidas del árbol, que son adquiridas en una parcela de 100 x 100 m, con las características mencionadas en el ítem 3.3.1.

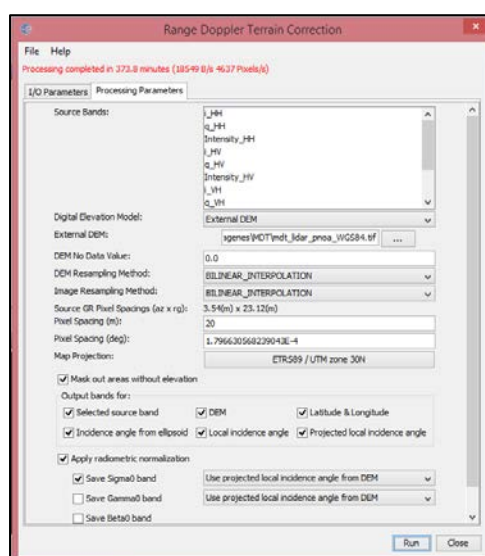


Figura 4.8 Interfaz para corrección geométrica y radiométrica de Sentinel Toolbox para imagen ALOS-PALSAR

Dada las características de la imagen RADARSAT-2, el tamaño del píxel seleccionado es de 10 metros, a fin de tener una correlación con los datos que son adquiridos a través de DHP, y TRAC.

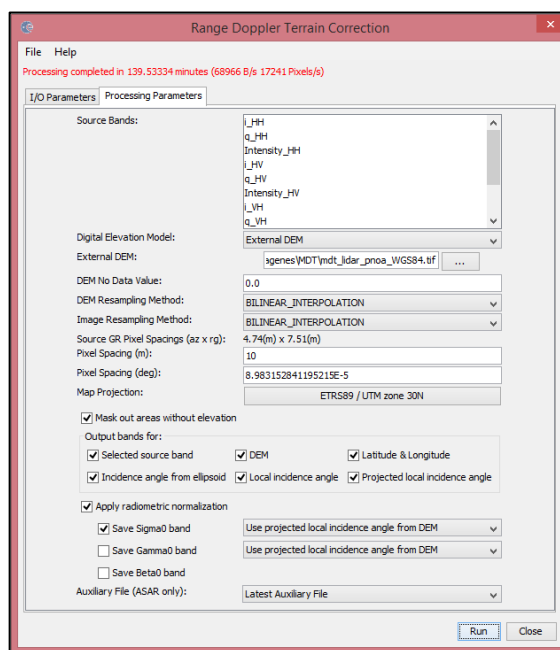


Figura 4.9 Interfaz para corrección geométrica y radiométrica de Sentinel Toolbox para imagen RADARSAT-2

Las imágenes ortorectificadas en función de σ_0 para cada una de las polarizaciones, se las puede observar en las siguientes figuras, tanto para ALOS-PALSAR como para RADARSAT-2.

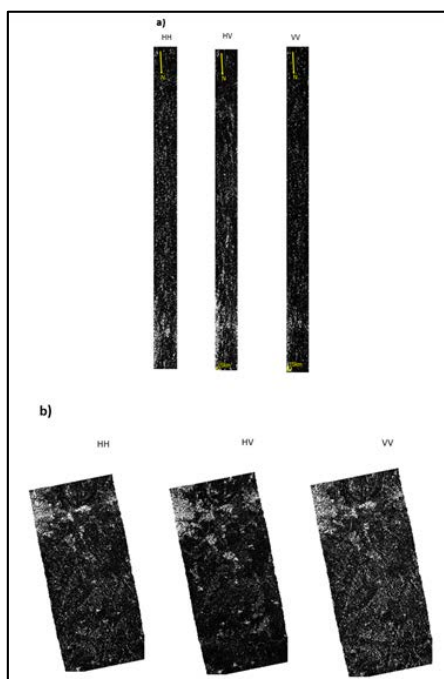


Figura 4.10 a) Imágenes ALOS-PALSAR no corregidas b) Imágenes ALOS-PALSAR ortorectificadas

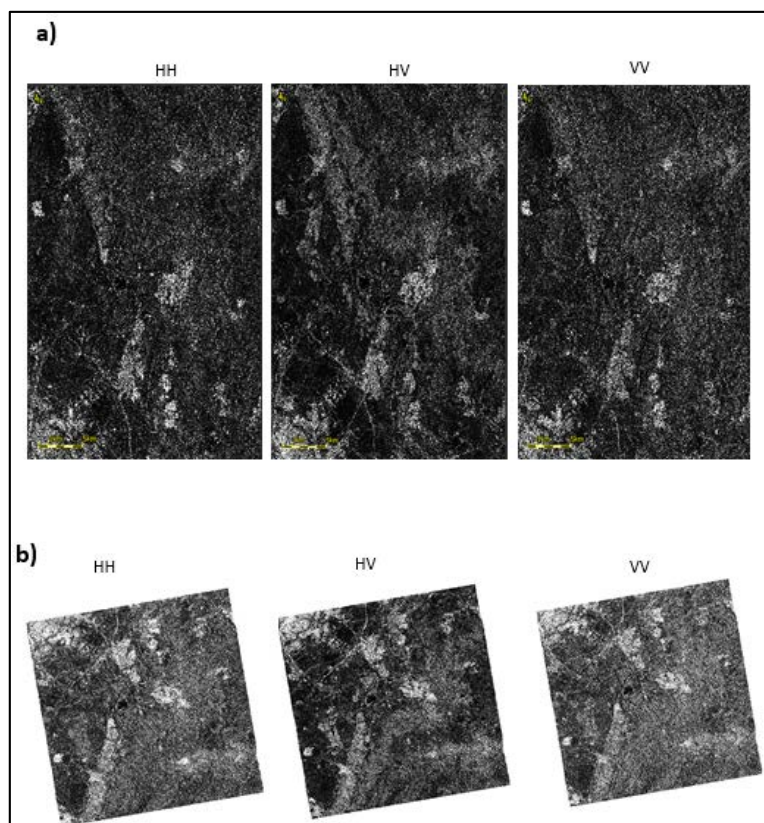


Figura 4.11 a) Imágenes RADARSAT-2 no corregidas b) Imágenes RADARSAT-2 ortorectificadas

Las imágenes RADAR son sometidas a un proceso reductor de speckle, y se calcula el valor de σ^0 en decibelios para las polarizaciones HH, HV y VV. Posteriormente se combina las bandas en decibelios de σ^0 HH, σ^0 HV, σ^0 VV y del ángulo local de incidencia proyectado obteniendo una sola imagen por sensor. Para la obtención de los coeficientes presentes en las ecuaciones [17] y [18] se realiza un resample a 100 metros, a fin de correlacionar el tamaño del píxel con la parcela estudiada (1 ha.) mediante técnicas convencionales (i.e. ecuaciones alométricas) y técnicas por fracción de huecos (i.e. DHP y TRAC), en la siguiente figura se aprecia el resultado de las imágenes con un tamaño de píxel de 100 metros.

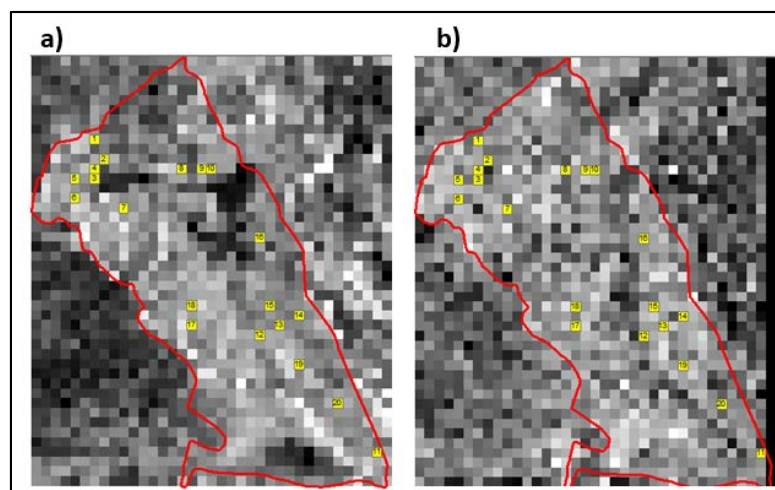


Figura 4.12 a) AlosPalsar a 100 metros de resolución b) RadarSat-2 a 100 metros de resolución, en amarillo se aprecia las parcelas estudiadas

Los ángulos θ_0 y θ_1 son obtenidos a partir de los metadatos de cada imagen, se considera el ángulo θ_0 mayor para RADARSAT-2 ya que al utilizar ángulos de incidencia grandes se obtiene más interacción de las microondas con la vegetación y se infiere información sobre su estructura (Héctor & Blanco, 2006).

Los coeficientes utilizados para obtener la estimación de biomasa son los descritos en la Tabla 3.9, los mismos que tienen un R^2 de 0.54 para AlosPalsar y 0.59 para RadarSat-2.

A continuación se presentan los resultados para estimación de biomasa mediante imágenes radar para los dos sensores aquí utilizados, en función del tamaño de pixel (100x100 metros), estos datos son obtenidos a través de la correlación de los datos obtenidos mediante ecuaciones alométricas y técnica TRAC, la metodología DHP, se realizó únicamente en la Parcela 11, la misma que solo se detalla los resultados del LAI corregido a fin de comparar con los datos de LAI obtenidos mediante TRAC.

Tabla 4.7 Estimación de biomasa mediante imagen ALOSPALSAR

No. parcela	σ^0_{HV}	σ^0_{HH}	σ^0_{VV}	θ_l	Biomasa del fuste tn/ha
1	-14.999625	-10.370495	-12.121653	22.881432	34.58639481
2	-16.49987	-9.499787	-9.609911	22.876694	38.75988547
3	-15.413545	-7.152172	-7.158229	22.870548	32.37077207
4	-13.915581	-7.557545	-9.109926	22.873962	27.75695234
5	-15.981675	-6.714712	-10.779644	22.85334	34.07891841
6	-16.598728	-10.659656	-11.060319	22.849031	41.07116635
7	-15.651211	-10.079954	-9.854327	22.90696	36.26204498
8	-13.921105	-9.370686	-10.705987	22.940966	29.40300619
9	-16.34853	-5.287038	-7.08288	22.963848	31.03822437
10	-15.321685	-9.370939	-13.535477	22.971397	32.72235279
11	-17.493179	-10.460733	-12.340109	23.066168	40.08386286
12	-14.96297	-9.013799	-11.38873	22.987638	31.10907716
13	-17.33728	-11.094979	-13.117898	23.005613	42.11600351
14	-15.755591	-10.933282	-12.216704	23.032169	36.89295588
15	-16.157549	-11.370217	-12.830307	22.992815	39.31968466
16	-13.864761	-9.445305	-13.94811	22.999012	28.49477908
17	-16.424631	-5.392397	-11.265388	22.929039	32.1352292
18	-15.288715	-9.182666	-11.909124	22.937571	33.00756794
19	-13.876304	-6.979431	-9.282586	23.022621	24.50910862
20	-16.35099	-9.57471	-15.040043	23.039352	34.695716



Tabla 4.8 Estimación de biomasa mediante imagen RADARSAT-2

No. parcela	σ^0_{HV}	σ^0_{HH}	σ^0_{VV}	θ_l	Biomasa aérea total tn/ha
1	-15.906092	-12.406582	-13.965876	38.533871	46.11224594
2	-15.759418	-13.990859	-13.572981	38.538399	55.67766634
3	-16.698156	-14.496553	-15.437823	38.535507	56.73108113
4	-16.684866	-14.169602	-14.329061	38.535988	58.0975514
5	-16.934687	-11.821363	-12.837664	38.520302	48.91495343
6	-16.441269	-15.446983	-15.156763	38.519012	62.04980999
7	-14.453444	-14.592283	-12.509119	38.555695	57.90239585
8	-17.254622	-12.619344	-14.258829	38.580032	60.81631034
9	-16.215298	-15.104706	-13.941701	38.596237	66.28256169
10	-14.301225	-10.958624	-14.067951	38.601059	33.93849204
11	-16.492378	-10.80698	-11.222557	38.669907	39.49622289
12	-17.787642	-10.792676	-12.932332	38.619232	60.18341841
13	-17.668173	-10.646613	-14.660482	38.619961	51.0338853
14	-14.941449	-10.632735	-13.745291	38.636719	38.73433779
15	-17.880728	-13.950948	-11.129076	38.621738	83.94127167
16	-17.853264	-13.022377	-14.878075	38.627148	63.18959575
17	-15.982174	-13.374066	-13.275784	38.572983	56.07747228
18	-15.879429	-12.002821	-15.512568	38.579536	40.35077591
19	-15.346973	-14.65325	-11.316256	38.632805	71.74795557
20	-16.496241	-13.341107	-12.790648	38.652203	67.92827232

4.1.4. Análisis estadístico

Los coeficientes se obtienen mediante una regresión no lineal, a través del programa SPSS, mediante el método Levenber - Marquardt, los coeficientes de determinación R^2 aquí obtenidos se asemejan al trabajo realizado por Saatchi et al. (2007), los parámetros obtenidos se utilizan en las ecuaciones [17] y [18], a fin de obtener la estimación de biomasa para el fuste mediante imagen ALOSPALSAR y biomasa aérea a través de la imagen RADARSAT-2.

Tabla 4.9 Coeficientes obtenidos para aplicación de metodología

IMAGEN RADAR	A0	A1	A2	B1	B2	C1	C2	R ²
ALOSPALSAR	6.7391	0.1227	0.1573	0.1584	0.2818	0.0058	-0.0150	0.5400
RADARSAT-2	1.3270	-0.5690	1.3577	-0.2091	0.2217	0.4218	-1.1452	0.5900

En las siguientes figuras se aprecia la sensibilidad de retrodifusión que tiene la banda L de ALOSPALSAR, y la banda C de RADARSAT, con la biomasa del fuste obtenida por ecuaciones alométricas y biomasa aérea obtenida por TRAC respectivamente

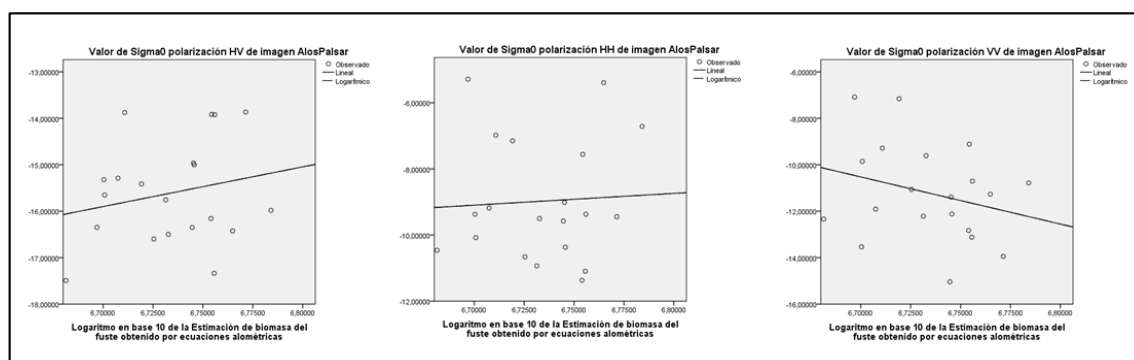


Figura 4.13 Coeficiente de retrodifusión en combinaciones de polarización lineal para imagen ALOSPALSAR frente al logaritmo natural de las medidas de biomasa del fuste para 20 parcelas forestales

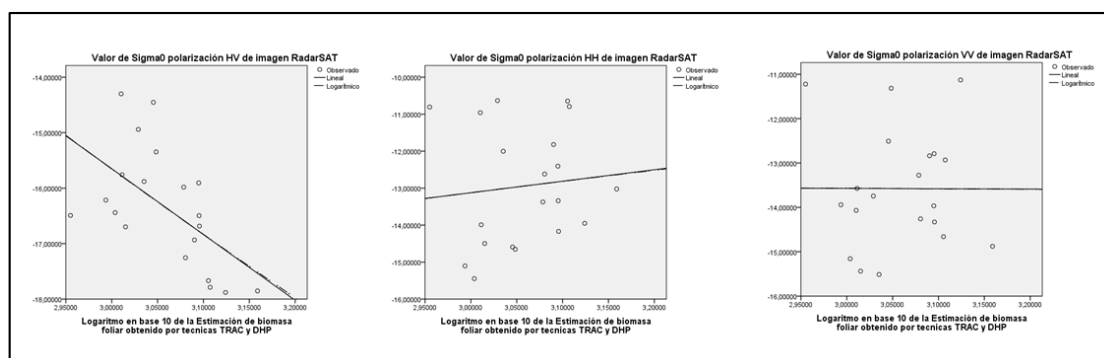


Figura 4.14 Coeficiente de retrodifusión en combinaciones de polarización lineal para imagen RADARSAT-2 frente al logaritmo natural de las medidas de biomasa del fuste para 20 parcelas forestales

La estimación de biomasa del fuste se realizó utilizando la ecuación [17], a través de los datos obtenidos por ecuaciones alométricas de las 20 parcelas muestreadas, dentro de los 20 metros de resolución

de la imagen ALOSPALSAR y 10 metros para RADARSAT-2. La comparación de los valores obtenidos en campo mediante alometría versus la estimación de biomasa mediante la imagen ALOSPALSAR, y los datos obtenidos a través de TRAC versus la estimación de biomasa obtenida a través de datos de la imagen RADARSAT-2, se puede apreciar en la siguiente figura.

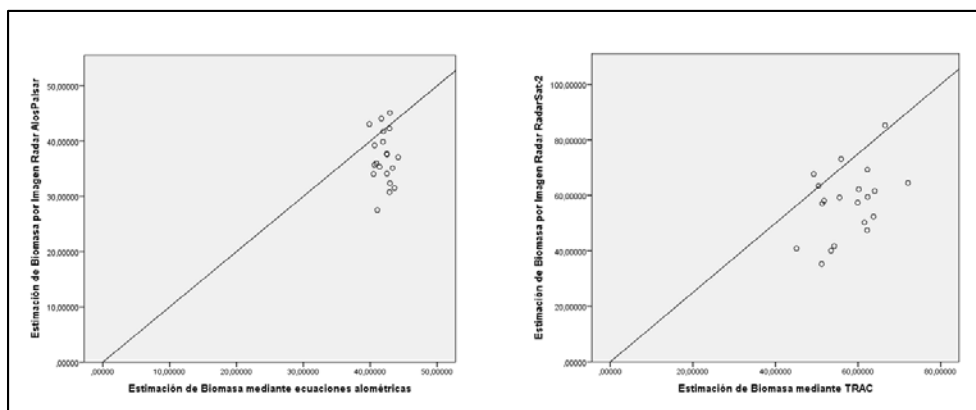


Figura 4.15 Comparación de datos obtenidos mediante datos de campo versus valores estimados de imágenes radar

Se puede apreciar una clara necesidad de adquirir una mayor cantidad de muestras, o realizar una comparación con resultados de biomasa obtenidos mediante técnicas destructivas, a fin de consolidar los resultados, a pesar que los coeficientes de determinación R^2 obtenidos se asemejan a los obtenidos por el autor Saatchi et al. (2007).

4.2. MAPA TEMÁTICO DE IDENTIFICACIÓN DE BIOMASA FORESTAL CON SISTEMA RADAR.-

La generación de los mapas de estimación de biomasa mediante imágenes radar, se los realiza generando previamente una clasificación no supervisada de las imágenes ortorectificadas de cada uno de los sensores estudiados en el presente proyecto, con la finalidad de extraer únicamente las áreas con cobertura forestal tal como se observa en la Figura 4.16, posteriormente se realiza una reclasificación en 11 clases a fin de interpretar los resultados, considerando pendientes inferiores a 15° , con estas coberturas forestales seleccionadas se procede a extraer la información de estimación de biomasa obtenidas en las imágenes radar por medio de herramientas SIG.

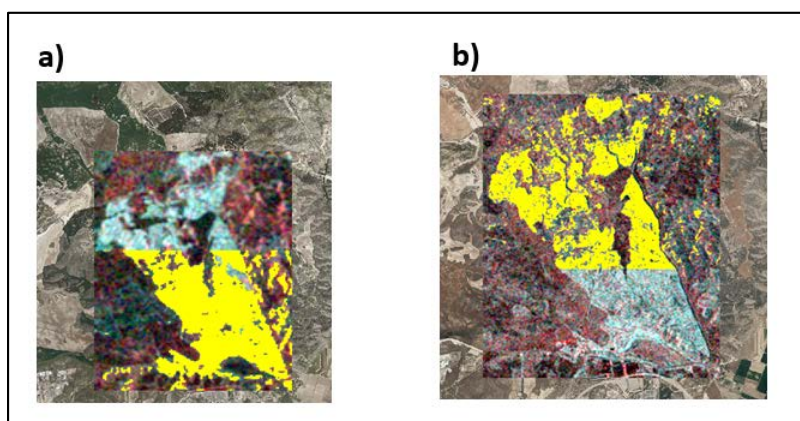


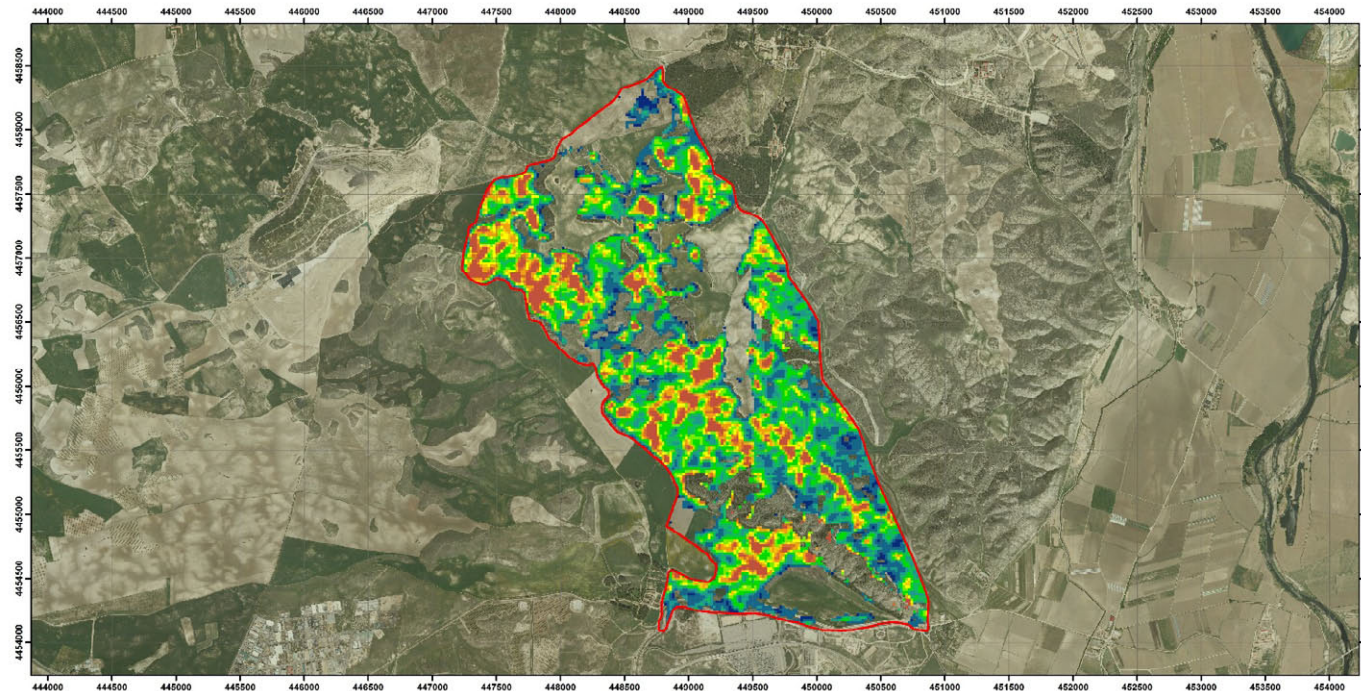
Figura 4.16 a) Coberturas forestales de imagen AlosPalsar b) Coberturas forestales de imagen RadarSat-2

La escala de los mapas temáticos se encuentran en función de la resolución detectable considerando el Root Mean Square (RMSE) o el error medio cuadrático del proceso de ortorectificación que considera las deformaciones del terreno, y en base a la normativa del Federal Geographic Data Committee (FGDC) que es un organismo importante a nivel internacional que ayuda a definir los estándares en cuanto a producción cartográfica o topográfica se refiere.

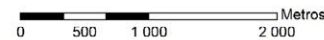
Con esto indicado se obtiene una escala de producción del mapa para la imagen ALOSPALSAR de 1:80.000 y para RADARSAT-2 de 1:40.0000. Los productos temáticos resultantes son impresos a una escala de 1:25.000 para un formato de hoja A3.

ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR

ESTIMACIÓN DE BIOMASA DEL FUSTE CON IMAGEN ALOS-PALSAR



Proyección: Universal Transversa de Mercator
Zona: 30 Norte
Sistema de Referencia: ETRS 89

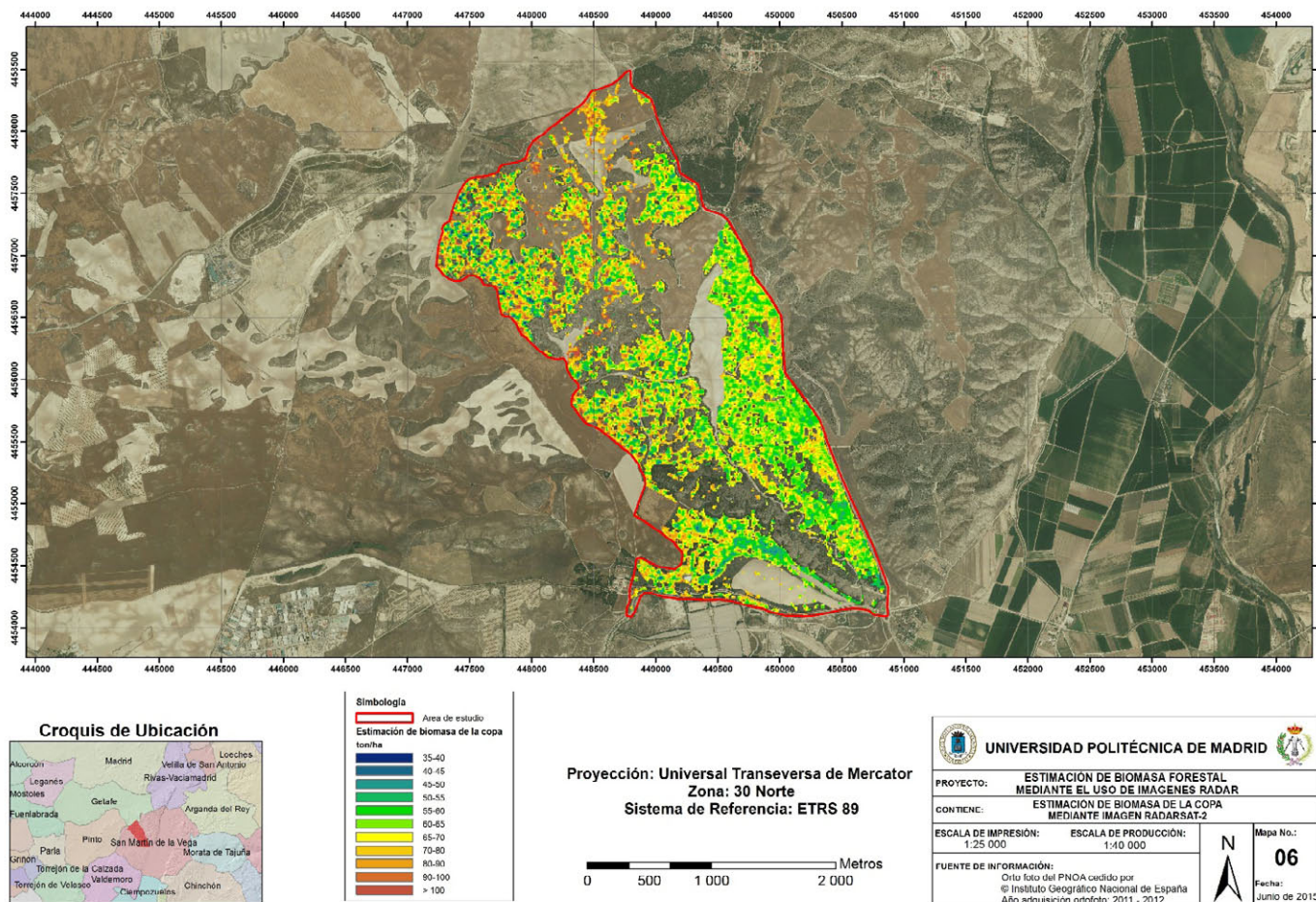


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID	
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR	
CONTIENE: ESTIMACIÓN DE BIOMASA DEL FUSTE MEDIANTE IMAGEN RADAR ALOS-PALSAR	
ESCALA DE IMPRESIÓN: 1:25 000	ESCALA DE PRODUCCIÓN: 1:80 000
FUENTE DE INFORMACIÓN: Ortofoto del PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional de España Año adquisición ortofoto: 2011 - 2012	
	Mapa No.: 05 Fecha: Junio de 2015

Mapa 4.1 Estimación de biomasa del fuste mediante imagen radar ALOS-PALSAR

ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR

ESTIMACIÓN DE BIOMASA DE LA COPA CON IMAGEN RADARSAT-2



Mapa 4.2 Estimación de biomasa de la copa mediante imagen RADARSAT-2



4.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.-

El desarrollo de los sistemas SAR, ha permitido incursionar en temas de conservación ambiental de gran interés mundial, proporcionando herramientas que brindan resultados precisos al momento de determinar parámetros biofísicos, el presente proyecto proporciona un importante conocimiento de las ventajas que tienen las imágenes SAR en la estimación de biomasa forestal, es así como este tipo de metodologías ayudarían, a países con una cobertura tropical, o bosques nublados, donde las condiciones climatológicas no son el mejor aliado frente a imágenes que trabajan en el espectro visible o infrarrojo.

El desarrollo de este estudio ha servido de adiestramiento al momento de implementar este tipo de metodologías para la estimación de biomasa forestal en la República del Ecuador, país, que ha experimentado en los últimos años, un cambio radical en políticas ambientales, en post de la conservación. Recientemente en el año 2008, se generó el primer mapa de carbono forestal, el cual fue actualizado para el año 2011, no obstante, la geografía del país, presenta muchas regiones tropicales, y bosques nublados, donde la adquisición de la información, mediante sensores pasivos, son por decir, improbables, provocando un alto costo en trabajos de campo. Por tanto es innegable el uso de metodologías SAR, para estimación de biomasa forestal, es así, como este estudio abre las puertas para la implementación e investigación de metodologías de estimación de biomasa y carbono forestal a través del uso de imágenes radar.

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.-

- La obtención de la estimación de biomasa forestal es una información de vital importancia, no solo para el cumplimiento del protocolo de Kioto, si no para el bienestar mundial, por lo tanto encontrar metodologías de estimación por técnicas no destructivas, ayudarán a la toma de decisiones de los gobiernos locales, a fin de hallar respuestas urgentes para ser frente al cambio climático.
- Los resultados aquí obtenidos demuestran una fiabilidad considerable al momento del tratamiento de información radar, sin embargo es necesario comparar estos resultados con datos obtenidos de procesos destructivos a fin de establecer unos coeficientes acordes a la zona de estudio y a las características propias del bosque.
- El desarrollo de este estudio ha permitido aplicar metodologías no destructivas y correlacionar su resultados con los datos de las imágenes radar, no obstante se puede mejorar los procesos si se consideran otras variables como la densidad de árboles, la misma que se puede calcular con las distancias entre árboles muestreados para tener una idea de la cantidad de muestras por hectárea, de tal manera que se podría aproximar de mejor forma los resultados de las ecuaciones alométricas en función de la densidad y no de las muestras adquiridas.
- Es importante recalcar que se ha utilizado un error de estimación del 21% para la definición del tamaño de muestra, esto en función del presupuesto y recursos del estudio, lo que se podría mejorar notablemente los resultados si se considera un tamaño de muestra superior.
- La adquisición de datos como el diámetro a altura de pecho, TRAC o DHP, no tienen dificultad en su adquisición y procesamiento, sin embargo es importante que todos los parámetros de calibración, ajuste y correlación sean correctos y exactos para el procesamiento de esta información, a fin de obtener una estimación de biomasa fiable.
- Las imágenes radar conllevan un pre-procesamiento de la información la misma que debe estar acorde a la escala de producción.
- La metodología descrita por Saatchi et al. (2007), determina unos coeficientes de determinación R^2 parecidos a los obtenidos en este estudio, sin embargo existe una gran diferencia entre las parcelas de muestreo, por lo que es necesario adquirir una mayor cantidad de datos.
- La banda C presenta una correlación baja tal como describe Lu (2006); Thompson (1986), para la relación entre los datos SAR y biomasa.
- Los datos de biomasa obtenidos a través del sensor RADARSAT-2 se saturan rápidamente, presentando valores únicamente entre 30 y 140 tn/ha.
- Existe una gran diferencia entre las fechas de toma de las imágenes radar versus los datos adquiridos en campo, por lo que los resultados no podrían ser considerados en la actualidad.



CAPITULO VI BIBLIOGRAFÍA

6.1.REFERENCIAS.-

- Acosta Mireles, M., Vargas Hernández, J., Velázquez Martínez, A., & Etchevers Barra, J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones Alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36, 725–736.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., & Métivier, L. (2011). ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85, 457–473. doi:10.1007/s00190-011-0444-4
- Austin, J. M., Mackey, B. G., & Van Niel, K. P. (2003). Estimating forest biomass using satellite radar: An exploratory study in a temperate Australian Eucalyptus forest. *Forest Ecology and Management*, 176(1), 575–583. doi:10.1016/S0378-1127(02)00314-6
- Balzter, H. (2001). Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (InSAR). *Progress in Physical Geography*, 25(2), 159–177. doi:10.1177/030913330102500201
- Beaudoin, A., Le Toan, T., Goze, S., Nezry, E., Lópes, A., Mougin, E., ... Shin, R. T. (1994). Retrieval of forest biomass from SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 15(14), 2777–2796. doi:10.1080/01431169408954284
- Bertzky, M., Ravilious, C., Kapos, V., Dickson, B., Carrión, D., & Chiu, M. (2011). *Carbono, biodiversidad y servicios ecosistémicos: explorando los beneficios múltiples*. UNEP-WCMC.
- Birk, R., Camus, W., Valenti, E., & McCandless, W. J. (1995). Synthetic Aperture Radar Imaging Systems. *IEEE AES Systems Magazine*, (November).
- Börner, T., Papathanassiou, K., Marquart, N., Zink, M., Meininger, M., Meadows, P. J., ... Roisch Tell, B. (2007). ALOS PALSAR Products Verification. *IEEE*, 5214–5217.
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*. (Forestry Paper - 134). Urbana, Illinois: Food & Agriculture Org.
- Brown, S., Gillespie, A. J. R., & Lugo, A. E. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*.
- Brown, S., Iverson, L. R., & Lugo, A. E. (1994). *Land-use and biomass changes of forests in Peninsular Malaysia from 1972 to 1982: a GIS approach*. (Dale, Ed.). New York: Springer Verlag.
- Brown, S., & Lugo, A. E. (1982). The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, 14, 161–187. doi:10.2307/2388024
- Brown, S., & Lugo, A. E. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia*. Caracas, 17(1), 8–18.
- Calderwood, T. D., Greenway, L., & Hill, S. (1998). Highlights of NRL 's First 75 Years, 1–28.
- Calvo Polanco, M., Silva Pando, F. J., Rozados Lorenzo, M. J., Díaz Blanco, M., Rodríguez Dorriba, P., & Duo Suárez, I. (2005). El índice de área foliar (LAI) en masas de abedul (*Betula celtiberica* rothm. et vasc.) en Galicia. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 20, 111–116.



- Castillo Santiago, M. A. (2009). *Análisis con imágenes satelitales de los recursos forestales en el trópico húmedo de Chiapas: Un estudio de caso en Marqués de Comillas*.
- Chambers, J. Q., Asner, G. P., Morton, D. C., Anderson, L. O., Saatchi, S. S., Espírito Santo, F. D. B., ... Souza, C. (2007). Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(8), 414–423. doi:10.1016/j.tree.2007.05.001
- Chan, Y. K., & Koo, V. C. (2008). An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR), 2, 27–60.
- Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025–1035.
- Chen, J. M., & Cihlar, J. (1995). Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index. *Applied Optics*, 34(27), 6211–6222. doi:10.1364/AO.34.006211
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., & Plummer, S. (1997). Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102, 29429. doi:10.1029/97JD01107
- Chuvieco Salinero, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. (Rialp., Ed.). Madrid, España.
- Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic aperture radar : systems and signal*. (J. W. & Sons, Ed.).
- Deans, J. D., Moran, J., & Grace, J. (1996). Biomass relationships for tree species in regenerating semi- deciduous tropical moist forest in Cameroon. *Forest Ecology and Management*, 88(96), 215–225.
- Díaz Franco, R., Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., Buendía Rodríguez, E., Flores Ayala, E., & Etchevers Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl . et Cham, 13(1), 25–34.
- Díaz, G. M., Lencinas, J. D., & del Valle, H. (2014). Introducción a la fotografía hemisférica en ciencias forestales. *Madera Y Bosques*, 20(1), 109–117.
- Dixon, R. K., Winjum, J. K., & Schroeder, P. E. (1993). Conservation and sequestration of carbon: the potential of forest and agroforest management practices. *Global Environmental Change*, 3(2), 159–173.
- Dobson, M. C., & Sharik, L. (1995). Estimation of Forest Biophysical Characteristics in Northern Michigan with SIR-C/X-SAR, 33(4).
- Drake, J. B., Knox, R. G., Dubayah, R. O., Clark, D. B., Condit, R., Blair, J. B., & Hofton, M. (2003). Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing : factors. *Global Ecology & Biogeography*, 12, 147–159.
- European Space Agency. (2007). Information on ALOS PALSAR Products for ADEN Users, (1).
- FAO. (1993). *Evaluación de los recursos forestales 1990 Países tropicales Evaluación de los recursos forestales 1990 Países tropicales*. Roma.
- FAO. (1995). *Evaluación de los recursos forestales 1990 Síntesis mundial*. Roma.
- FAO, & JRC. (2012). *Global forest land-use change 1990–2005* (No. 169). Roma.
- Fernández, P. (1996). *Determinación del tamaño muestral. Atención Primaria en la Red* (Vol. 3). A Coruña.



- Foody, G. M., Boyd, D. S., & Cutler, M. E. J. (2003). Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 85(4), 463–474. doi:10.1016/S0034-4257(03)00039-7
- Fransson, J. E. S., Walter, F., & Ulander, L. M. H. (2000). Estimation of forest parameters using CARABAS-II VHF SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2), 720–727. doi:10.1109/36.842001
- Furones, Á. M. (2010). *Sistema y marco de referencia terrestre. sistemas de coordenadas*. Valencia, España.
- García, E. (2005). *Balance de agua y carbono en un ecosistema mediterráneo de costa*. Universidad de Alicante.
- García, E., Lledó, M. J., & Sánchez, J. R. (2013). Estimación del índice de área foliar (LAI) de un pinar costero de *AgroBolivia*, 21.
- García, J. L., & Martínez, M. J. (2014). *Biomasa y Biotecnología*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Ghasemi, N., Sahebi, M. R., & Mohammadzadeh, A. (2010). A review on biomass estimation methods using synthetic aperture radar data. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(4), 776–788. review on biomass estimation methods using synthetic ap. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(4), 776–788.
- Grupo Empresarial ENCE. (2009). *El Valor de la Biomasa Forestal*.
- Harrell, P. A., Kasischke, E. S., Bourgeau Chavez, L. L., Haney, E. M., & Christensen Jr., N. L. (1997). Evaluation of approaches to estimating aboveground biomass in Southern pine forests using SIR-C data. *Remote Sensing of Environment*, 59(96), 223–233. doi:10.1016/S0034-4257(96)00155-1
- Hawkins, R. K. (1990). Determination of Antenna Elevation Pattern For Airborne SAR Using the Rough Target Approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5), 896–905.
- Héctor, F. del V., & Blanco, P. D. (2006). Indicadores espectrales del rango de las microondas para la evaluación y monitoreo de la erosión eólica. *Indicadores de La Desertificación Para América Del Sur*, 65–84.
- Heer, C., Fischer, C., & Schaefer, C. (2010). Spaceborne SAR Systems and technologies. *2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 538–541. doi:10.1109/MWSYM.2010.5517840
- Held, D. N., Brown, W. E., Freeman, A., Klein, J. D., Zebker, H. A., Sate, T., ... Lou, Y. (1988). The NASA- JPL multifrequency multipolarisation airborne SAR. In IEEE (Ed.), (pp. 345–349). doi:10.1109/IGARSS.1988.570130
- Hilland, J. E., Stuhr, F. V., Freeman, A., Imel, D., Shen, Y., Roland, I., & Car, E. R. (1998). Future NASA Spaceborne SAR Missions, (April 1994).
- Hovland, H. a., Johannessen, J. a., & Digranes, G. (1994). Slick detection in SAR images. *Proceedings of IGARSS '94 - 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4, 2038–2040. doi:10.1109/IGARSS.1994.399647
- Huxley, J., Strauss, R. E., & Churchill, F. B. (1932). Problems of relative growth.
- Ingram, J. C., Dawson, T. P., & Whittaker, R. J. (2005). Mapping tropical forest structure in southeastern Madagascar using remote sensing and artificial neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 94, 491–507. doi:10.1016/j.rse.2004.12.001



- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecological Society of America*, 50(4), 663–666.
- Jordan, R. L., Huneycutt, B. L., & Werner, M. (1993). The SIR-C / X-SAR Synthetic Aperture Radar System, 79(6).
- Kasischke, E. S., Melack, J. M., & Dobson, M. C. (1997). The use of imaging radars for ecological applications - A review. *Remote Sensing of Environment*, 59(96), 141–156. doi:10.1016/S0034-4257(96)00148-4
- Keeling, C. D., Whorf, T. P., Wahlen, M., & Van der Plicht, J. (1995). Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375(6533), 666–670. doi:10.1038/375666a0
- Kellndorfer, J. M., Pierce, L. E., Dobson, M. C., & Ulaby, F. T. (1998). Toward Consistent Regional-to-Global-Scale Vegetation Characterization Using Orbital SAR Systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5), 1396–1411.
- Kollman, F. (1959). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Parte I*. Springer Verlag.
- Kwok, R., Rignot, E., & Drive, G. (1990). Synthetic aperture radar polarimetry of sea ice. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 88, 1525–1528.
- Le Toan, T., & Floury, N. (1998). On the retrieval of forest biomass from SAR data. *EUROPEAN SPACE AGENCY-PUBLICATIONS-ESA SP*, 441, 213–214. doi:10.1109/IGARSS.2003.1294201
- Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M. W. J., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., ... Ulander, L. M. H. (2011). The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2850–2860. doi:10.1016/j.rse.2011.03.020
- Le Toan, T., Quegan, S., Woodward, I., Lomas, M., Delbart, N., & Picard, G. (2004). Relating Radar Remote Sensing of Biomass to Modelling of Forest Carbon Budgets. *Climatic Change*, 67(2-3), 379–402. doi:10.1007/s10584-004-3155-5
- Leblanc, S. G. (2002). Correction to the plant canopy gap-size analysis theory used by the Tracing Radiation and Architecture of Canopies instrument. *Applied Optics*, 41(36), 7667–7670. doi:10.1364/AO.41.007667
- Leblanc, S. G. (2004). Digital Hemispherical Photography Manual. *Natural Resources Canada*, 1–27.
- Leblanc, S. G., Chen, J. M., & Kwong, M. (2002). Tracing radiation and architecture of canopies. TRAC Manual. Version 2.1. 3. *Natural Resources Canada*, (September), 1–25.
- Lim, H. H., Swartz, A. A., Yueh, H. A., Kong, J. A., Shin, R. T., & Van Zyl, J. J. (1989). Classification of earth terrain using polarimetric synthetic aperture radar images. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 94. doi:0148-0227
- Lim, K., Treitz, P., Baldwin, K., Morrison, I., & Green, J. (2003). Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), 658–678.
- López Ochoa, L. A. (2012). *Ecuaciones Alométricas y estimación de Incrementos en biomasa aérea en una Plantación de Pinus halepensis Mill. en Saltillo, Coahuila*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Lopez Serrano, F. R., Morote, F. A. G., & Barrero, J. J. (1997). Estimación indirecta del índice de área foliar (LAI), utilizando el LAI-2000 (licor,1991) en arboles individuales de Pinus halepensis mill. *Congresos Forestales*, 347–352.
- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297–1328. doi:10.1080/01431160500486732



- Luckman, A., Baker, J., & Honza, M. (1998). Tropical Forest Biomass Density Estimation Using JERS-1 SAR : Seasonal Variation , Confidence Limits , and Application to Image Mosaics. *Remote Sensing of Environment*, 63(2), 126–139.
- Ludwig, M., Torres, R., Ostergaard, A., Rostan, F., Schaefer, C., & Croci, R. (2011). The Sentinel-1 SAR Instrument Current Status and Outlook. *IEEE*, 1–4.
- Lynne, G. J., & Taylor, G. R. (1986). Geological assessment of SIR- B imagery of the amadeus basin. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, GE-24(4), 575–581.
- Madsen, S. N., Christensen, E. L., Skou, N., & Dall, J. (1991). The Danish SAR system: design and initial tests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(3), 417–426. doi:10.1109/36.79432
- Malhi, Y., Meir, P., & Brown, S. (2002). Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 360(1797), 1567 – 1591. doi:10.1098/rsta.2002.1020
- Mas, J. F., Díaz Gallegos, J. R., & Vega, A. P. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geograficas*, 51, 53–72.
- Merino de Miguel, S., & Solana Gutiérrez, J. (2000). *Estimación de biomasa en masas regulares por medio de imágenes de radar*. Madrid.
- Mette, T. (2007). *Forest Biomass Estimation from Polarimetric SAR Interferometry*.
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (2006). Cambio Climático.
- Montero, G., Ruiz Peinado, R., & Muñoz, M. (2005). *Producción de biomasa y fijación de CO2 por los bosques españoles*. (Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ed.) (Vol. 13). Madrid. Retrieved from http://libros.inia.es/libros/product_info.php?products_id=64
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal* (Daniel Nas.). Santa Cruz, Bolivia.
- Neches Olaso, R. (2011, April). Energías Renovables - Análisis y diagnóstico - La Biomasa, usos y aplicaciones. (Editorial Agrícola Española, Ed.) *Agricultura*, (939), 266–269.
- Nelson, R. F., Jimenez, J., Schnell, C. E., Hartshorn, G. S., Gregoire, T. G., & Oderwald, R. (2000). Technical note: Canopy height models and airborne lasers to estimate forest biomass: Two problems. *International Journal of Remote Sensing*, 21(11), 2153–2162. doi:10.1080/01431160050029486
- Nelson, R. F., Kimes, D. S., Salas, W. A., & Routhier, M. (2000). Secondary forest age and tropical forest biomass estimation using thematic mapper imagery. *Bioscience*, 50(5), 419–431. doi:10.1641/0006-3568(2000)050[0419:SFAATF]2.0.CO;2
- Nelson, R. F., Oderwald, R., & Gregoire, T. G. (1997). Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume, and biomass. *Remote Sensing of Environment*, 60(96), 311–326. doi:10.1016/S0034-4257(96)00213-1
- Nemoto, Y., Nishino, H., Ono, M., & Mizutamari, H. (1991). Japanese Earth Resources Satellite-1 Synthetic Aperture Radar, 79(6).
- Olson, J. S., Watts, J. A., & Allison, L. J. (1983). *Carbon in live vegetation of major world ecosystems*. Oak Ridge National Lab., TN (USA).
- Ordóñez, J. A., De Jong, B. H. J., & Masera, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de Pinus pseudostrobus en Nuevo San Juan , Michoacán. *Madera Y Bosques*, 7(2), 27–47.



- Parde, J. (1980). Forest biomass. In *Forestry Abstracts* (Vol. 41, pp. 343–362).
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4), 573–593.
- Phua, M.-H., & Saito, H. (2003). Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(4), 429–440.
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Nelson, R. F. (2003). Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), 564–577.
- Rauste, Y., Hame, T., Pulliainen, J. T., Heiska, K., & Hallikainen, M. T. (1994). Radar-based forest biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 15(14), 2797–2808.
- Reichle, D. E. (1981). *Dynamic properties of forest ecosystems*. Cambridge University Press.
- Rodríguez Vázquez de Aldana, B., García Criado, B., García Ciudad, A., & Zabalgogezcoa, I. (2012). Biomasa y cultivo de la colza. *Energía Sostenible Para Todos*, 1–5.
- Rojas Unda, S. R. (2011). *Evaluación de metodologías para identificación de cambio de uso*. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.
- Romeiser, R. (2013). The future of SAR-based oceanography: High-resolution current measurements by along-track interferometry. *Oceanography*, 26(2), 92–99. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95–107. doi:10.1016/0034-4257(95)00186-7
- Rosenqvist, A., Shimada, M., & Watanabe, M. (2004). ALOS PALSAR: Technical outline and mission concepts. *International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*, 1(7), 1–7.
- Roy, P. S., & Ravan, S. A. (1996). Biomass estimation using satellite remote sensing data—An investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Biosciences*, 21(4), 535–561. doi:10.1007/BF02703218
- Saatchi, S. S., Halligan, K., Despain, D. G., & Crabtree, R. L. (2007). Estimation of Forest Fuel Load From Radar Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6), 1726–1740. doi:10.1109/TGRS.2006.887002
- Santos, J. R., Freitas, C. C., Araujo, L. S., Dutra, L. V., Mura, J. C., Gama, F. F., ... Sant'Anna, S. J. S. (2003). Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment*, 87(4), 482–493. doi:10.1016/j.rse.2002.12.001
- Schloenhardt, A. (2008). *The illegal trade in timber and timber products in the Asia-Pacific region*. (A. I. of Criminology, Ed.) (89th ed.). Canberra: PenUltimate.
- Schubert, A., & Small, D. (2008). *Guide to ASAR Geocoding*. Remote Sensing Laboratories. Zürich, Germany.
- Schulze, E.-D., Wirth, C., & Heimann, M. (2000). *Climate change. Managing forests after Kyoto*. Science (Vol. 289). New York, N.Y. doi:10.1126/science.289.5487.2058
- Scipal, K., Arcioni, M., Chave, J., Dall, J., Fois, F., Le toan, T., ... Papathanassiou, K. (2010). The BIOMASS mission; An ESA Earth Explorer candidate to measure the BIOMASS of the earth's forests. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International*, 52–55.



- Siegenthaler, U., & Oeschger, H. (1987). Biospheric CO₂ emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus*, 39B(1-2), 140–154. doi:10.1111/j.1600-0889.1987.tb00278.x
- Sierra, R. (Ed.). (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental. Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia*. Quito, Ecuador: Editorial Rimana.
- Skolnik, M. I., & Ivan, M. (1970). *Radar Handbook*. (McGraw-Hill, Ed.).
- Staples, G. C. (2005). RADARSAT-2. In M. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 784–785). Springer.
- Steininger, M. K. (2000). Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: Data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6), 1139–1157. doi:10.1080/014311600210119
- Storvold, R., Malnes, E., Larsen, Y., Høgda, K. a., Hamran, S. E., Müller, K., & Langley, K. a. (2006). Sar Remote Sensing of Snow Parameters in Norwegian Areas — Current Status and Future Perspective. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 20(13), 1751–1759. doi:10.1163/156939306779292192
- Terán, J., Dauber, E., & Guzmán, R. (1992). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1, 1–10.
- Thompson, D. G., Arnold, D. V., Long, D. G., Miner, G. F., Karlinsey, T. W., & Robertson, A. E. (1997). YSAR: a compact low-cost synthetic aperture radar (Vol. 3161, pp. 2–8).
- Thompson, T. W. (1986). A User's Guide for the NASA/JPL Synthetic Aperture Radar and the NASA/JPL L-and C-band Scatterometers. *JPL Publication*, (83-38).
- Torge, W. (1983). *Geodesia*. Diana.
- Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, (8).
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1983). Microwave Remote Sensing : Active and Passive . Volume 1 : Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. *Annals of the Association of American Geographers*, 73(2), 315–316.
- Verstraete, M. M., & Pinty, B. (1996). Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing*, 34(5), 1254–1265.
- Walker, B., Sander, G., Thompson, M., Burns, B., Fellerhoff, R., & Dubbert, D. (1996). A high-resolution, four-band SAR Testbed with real-time image formation, 0529(505), 1881–1885.
- Walker, W., Baccini, A., Nepstad, M., Horning, N., Knigh, D., Braun, E., & Bausch, A. (2011). *Guía de Campo para la Estimación de Biomasa y Carbono Forestal*. Woods Hole Research Center.
- Way, J., & Smith, E. A. (1991). The Evolution of Synthetic Aperture Radar Systems and their Progression to the EOS SAR, 29(6).
- Weiss, M., & Baret, F. (2014). CAN-EYE V6.313 User Manual. *INRA Science & Impact*, (May).
- Woodcock, C. E., Collins, J. B., Jakabhazy, V. D., Li, X., Macomber, S. A., & Wu, Y. (1997). Inversion of the Li – Strahler Canopy Reflectance Model for Mapping Forest Structure. *IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing*, 35(2), 405–414. doi:10.1109/36.563279
- Wu, Y., & Strahler, A. H. (1994). Remote estimation of crown size, stand density, and biomass on the Oregon transect. *Ecological Applications*, 4(2), 299–312.



- Zhang, Y., Chen, J. M., & Miller, J. R. (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, 166–181. doi:10.1016/j.agrformet.2005.09.009
- Zhao, F., Strahler, A. H., Schaaf, C. L., Yao, T., Yang, X., Wang, Z., ... Newnham, G. J. (2012). Measuring gap fraction, element clumping index and LAI in Sierra Forest stands using a full-waveform ground-based lidar. *Remote Sensing of Environment*, 125, 73–79. doi:10.1016/j.rse.2012.07.007
- Zheng, D., Rademacher, J., Chen, J., Crow, T., Bresee, M., Le, J., & Ryu, S. (2004). Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM + data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, 93(3), 402–411. doi:10.1016/j.rse.2004.08.008
- Zheng, G., & Moskal, L. M. (2009). Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors*, 9, 2719–2745. doi:10.3390/s90402719



ANEXOS

Anexo 1. Acrónimos

AIRSAR	Airborne Synthetic Aperture Radar
ALOS	Satélite Avanzado de observación Terrestre
BEF	Factor de Expansión de Biomasa
CCRS	Centro Canadiense de Percepción Remota
CIFOR	Centro de Investigación Forestal
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático
CSA	Agencia Canadiense Espacial
DAP	Diámetro a Altura de Pecho
DARA	Agencia Espacial Alemana
DEM	Digital Elevation Model
DGB	Dirección General para la Biodiversidad
DHP	Fotografía Hemisférica Digital
ELAI	Índice de Área Foliar Efectivo
ERIMM	Instituto de Investigación Ambiental de Michigan
ERS-1	European Remote Sensing Satellite
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FORIS	Sistema de Información de Recursos Forestales
FPAR	Fraction of Photosynthetically Active Radiation
FRA	Global Forest Resources Assesment
GMO	Greenwich Mean Origin
IBP	Programa Biológico Internacional
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INIA	Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria
InSAR	Interferometría Radar de Apertura Sintética
IPCC	Panel Intergubernamental de expertos de Cambio Climático
IRP	IERS Reference Pole
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
JAROS	Organización Japonesa de Sistemas para la Observación de Recursos
JAXA	Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón
JERS-1	Japanese Earth Resources Satellite
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LAI	Índice de Área Foliar
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
MDA	MacDonald, Dettwiler and Associates
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIMA	Agencia Nacional de Imágenes y Mapas
NLAI	Índice de Área No Foliar
NRL	Navy Research Laboratory
OIMT	Organización Internacional de Maderas Tropicales
PAR	Radiación fotosintética activa
PLAI	LAI Proyectado
PNOA	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea de España
PRISM	Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping



RADAR	Radio Detection and Ranging
RAE	Real Academia Española
SAR	Synthetic Aperture Radar
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIR	Shuttle Imaging Radar
SLAR	Side Looking Airborne Radar
TLAI	Índice de Área Foliar Verdadero
ToLAI	Índice de Área Foliar Total
TRAC	Tracing Radiation and Architecture of Canopies
VOB	Volume Over Bark
YSAR	Young University Synthetic Aperture Radar



Anexo 2. Coordenadas de muestreo.-

Punto No.	ESTE	NORTE
1	447838.808	4457622.175
2	447940.271	4457460.250
3	447857.550	4457263.733
4	447850.046	4457354.475
5	447622.346	4457221.642
6	447634.992	4457065.533
7	448139.338	4456976.004
8	448738.583	4457319.113
9	448957.067	4457341.408
10	449062.246	4457341.996
11	450747.517	4454446.346
12	449551.362	4455637.046
13	449749.946	4455744.163
14	449956.412	4455860.783
15	449647.463	4455952.417
16	449543.425	4456658.708
17	448825.458	4455733.151
18	448848.901	4455947.766
19	449979.121	4455326.342
20	450351.517	4454957.317

Anexo 3. Apuntes de datos en campo.-



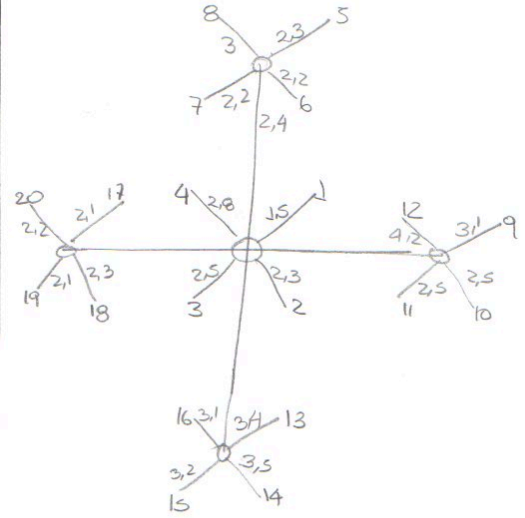
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA: 01/04/2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas
MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA	FOTOGRAFÍA/LÍNEA #		
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	
1	4457622	447838	
METODOLOGÍA		SELECCIONAR METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO	
TRAC			
DHP			
ALOMETRÍA		X	
ALTURA ELIPSOIDAL 624 m			
DESCRIPCIÓN: 1: 74 cm Diámetro a Altura de Pecho: 2: 96 cm 3: 60 cm. 4: 59'5 cm 5: 71 cm 6: 68'5 cm 7: 79 cm. 8: 83 cm 9: 112 cm 10: 109 cm 11: 55 cm 12: 50 cm 13: 56 cm 14: 56 cm 15: 66 cm 16: 83 cm 17: 82 cm 18: 49 cm 19: 80 cm 20: 54 cm		Croquis de parcela: 	
Hora de Inicio: Hora de Finalización:			
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-83 con proyección UTM. 40°16'02"N 3°36'4" W			



HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA: 01.04.2015	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
NOMBRE DEL TÉCNICO: Belén Noboa		FOTOGRAFÍA/LÍNEA#	
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	
2	4457490	447890	
MÉTODOLÓGIA		SELECCIONAR METODOLÓGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO	
TRAC			
DHP			
ALOMETRIA		X	
ALTURA ELIPSoidal 612			
DESCRIPCIÓN: Diámetro a: Altura de Pecho:		Croquis de parcela:	
1: 86'5 cm. 2: 67 cm 3: 50'5 cm. 4: 54 cm 5: 56 cm 6: 66 cm 7: 58'5 cm 8: 80'5 cm 9: 50 cm. 10: 83'5 cm. 11: 44'5 cm. 12: 85 cm 13: 78'5 cm. 14: 61 cm. 15: 54 cm. 16: 49 cm. 17: 56 cm. 18: 112 cm. 19: 82 cm. 20: 134 cm.			
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.			
45° 15' 58" N 3° 38' 46" W.			

<div style="text-align: center;"> HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION </div>					
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 01.04.2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Belén Niboa	FOTOGRAFÍA/LÍNEA #
NÚMERO DE PUNTO 3	NORTE 4457263	ESTE 4479102	METODOLOGÍA SELECCIONAR METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO		
ALTURA ELIPSOIDAL 626			TRAC		
			DHP		
			ALOMETRÍA		
DESCRIPCIÓN: Diámetro a Altura de Pecho:			Croquis de parcela:		
1: 68'5 cm 2: 68 cm. 3: 69 cm. 4: 78'5 cm. 5: 67 cm. 6: 52 cm. 7: 73 cm. 8: 53 cm. 9: 58'5 cm. 10: 83 cm. 11: 80 cm. 12: 52 cm. 13: 69 cm. 14: 78 cm. 15: 47 cm. 16: 56 cm. 17: 57 cm. 18: 64 cm. 19: 68 cm. 20: 67 cm.					
Hora de Inicio: Hora de Finalización:					
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.					
40° 15' 38" N 3° 36' 15" W					



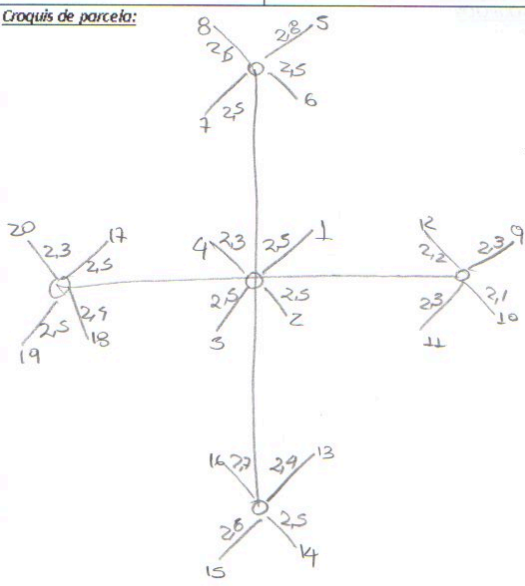


 HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION 			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA: 01.04.2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Belén Noboa
MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA	FOTOGRAFÍA/LÍNEA #		
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	
4	4457364	447822	
MÉTODOLÓGIA		SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO	
TRAC			
DHP			
ALOMETRIA		X	
ALTURA ELIPSoidal 619.			
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: 1: 78 cm. 2: 56 cm. 3: 51 cm. 4: 56 cm. 5: 70 cm. 6: 68 cm. 7: 69 cm. 8: 99 cm. 9: 68'5 cm. 10: 128 cm. 11: 115'5 cm. 12: 111 cm. 13: 78 cm. 14: 46 cm. 15: 82 cm. 16: 66 cm. 17: 44 cm. 18: 59 cm. 19: 82 cm. 20: 75 cm. Hora de Inicio: Hora de Finalización:			
Croquis de parcela: 			
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. 40° 15' 54" N. 3° 36' 49" W.			

HOJA DE CAMPO
LEVANTAMIENTO DE INFORMACION

PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 01.04.2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Belén Nolasco	FOTOGRAFÍA/LÍNEA #
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	MÉTODOLÓGIA SELECCIONAR METODOLÓGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO		
5.	4457210	447607			
ALTURA ELIPSOIDAL 610.					
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho:			Croquis de parcela:		
1: 74 cm. 2: 80 cm. 3: 74 cm. 4: 113 cm. 5: 81 cm. 6: 76 cm. 7: 63 cm. 8: 97 cm. 9: 62 cm. 10: 98 cm. 11: 81 cm. 12: 61 cm. 13: 60 cm. 14: 107 cm. 15: 90 cm. 16: 76 cm. 17: 91 cm. 18: 80 cm. 19: 59 cm. 20: 86,5 cm.					
Hora de Inicio: Hora de Finalización:			4N		
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.					
40° 15' 49" N 3° 36' 58" W					



							
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION							
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID		COMUNIDAD: MADRID		MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 01.04.2015		NOMBRE DEL TÉCNICO: Belén Noboa		FOTOGRAFIA/LÍNEA #
NUMERO DE PUNTO	NORTE		ESTE		METODOLOGÍA		
6	4457074		447617		SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO		
ALTURA ELIPSoidal 602				TRAC		DHP	
				ALOMETRIA		X	
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho:				Croquis de parcela:			
1: 79.5 cm. 2: 78 cm. 3: 48 cm. 4: 62 cm. 5: 60 cm. 6: 57 cm. 7: 67 cm. 8: 73 cm. 9: 58 cm. 10: 71 cm. 11: 56 cm. 12: 55 cm. 13: 58 cm. 14: 70 cm. 15: 81 cm. 16: 77 cm. 17: 72 cm. 18: 79 cm. 19: 70 cm. 20: 70 cm.							
Hora de Inicio: Hora de Finalización:							
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.							
				40° 15' 45" N 3° 36' 58" W			

HOJA DE CAMPO
LEVANTAMIENTO DE INFORMACION

PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 01.04.2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Belen Nabea	FOTOGRAFIA/LÍNEA#
NÚMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	METODOLOGÍA TRAC DHP ALOMETRIA		
7	4456985	448106			
ALTURA ELIPSoidal 62L			SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO <div style="text-align: center;">X</div>		

DESCRIPCIÓN:
Diámetro a
Altura de Pecho:

- 1: 69 cm.
- 2: 72 cm.
- 3: 74 cm.
- 4: 54 cm.
- 5: 71 cm.
- 6: 63 cm.
- 7: 57 cm.
- 8: 47 cm.
- 9: 64 cm.
- 10: 69 cm.
- 11: 47 cm.
- 12: 60 cm.
- 13: 56 cm.
- 14: 59 cm.
- 15: 62 cm.
- 16: 69 cm.
- 17: 41 cm.
- 18: 70 cm.
- 19: 84 cm.
- 20: 52 cm.



Hora de Inicio:
Hora de Finalización:

Croquis de parcela:

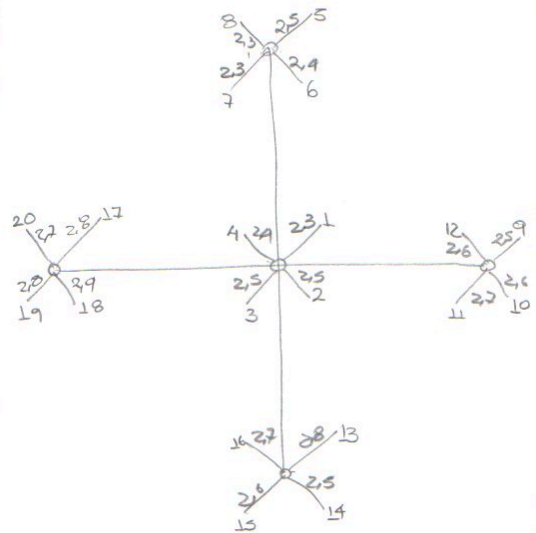
OBSERVACIONES
Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.

40° 15' 42" N
3° 03' 37" W.



 HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION 			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA: 01.04.2015	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
NOMBRE DEL TÉCNICO: Belén Noboa		FOTOGRAFÍA/LÍNEA #	
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	
8.	4457308	448728	
MÉTODOLÓGIA		SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO	
TRAC			
DHP			
ALOMETRIA		X	
ALTURA ELIPSODAL 605			
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: 1: 80 cm. 2: 97 cm. 3: 68 cm. 4: 86 cm. 5: 67 cm. 6: 98 cm. 7: 76 cm. 8: 79 cm. 9: 64 cm. 10: 65 cm. 11: 62 cm. 12: 76 cm. 13: 72 cm. 14: 85 cm. 15: 72 cm. 16: 59 cm. 17: 73 cm. 18: 52 cm. 19: 78 cm. 20: 56 cm. Hora de Inicio: Hora de Finalización: OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. 40° 15' 52" N. 3° 36' 10" W.			

Croquis de parcela:



HOJA DE CAMPO
LEVANTAMIENTO DE INFORMACION

PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 01.04.2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Belén Noboa	FOTOGRAFIA/LÍNEA #
NUMERO DE PUNTO 9	NORTE 4457334	ESTE 448974	MÉTODOLÓGIA TRAC DHP ALOMETRIA		
ALTURA ELIPSOIDAL 617			SELECCIONAR METODOLÓGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO X		

DESCRIPCION:

Diámetro a

Altura de Pecho:

- 1: 80 cm.
- 2: 58 cm.
- 3: 60 cm.
- 4: 45 cm.
- 5: 65 cm.
- 6: 56 cm.
- 7: 58 cm.
- 8: 56 cm.
- 9: 73 cm.
- 10: 53 cm.
- 11: 51 cm.
- 12: 56 cm.
- 13: 56 cm.
- 14: 47 cm.
- 15: 71 cm.
- 16: 75 cm.
- 17: 70 cm.
- 18: 70 cm.
- 19: 64 cm.
- 20: 58 cm.

Hora de Inicio:

Hora de Finalización:



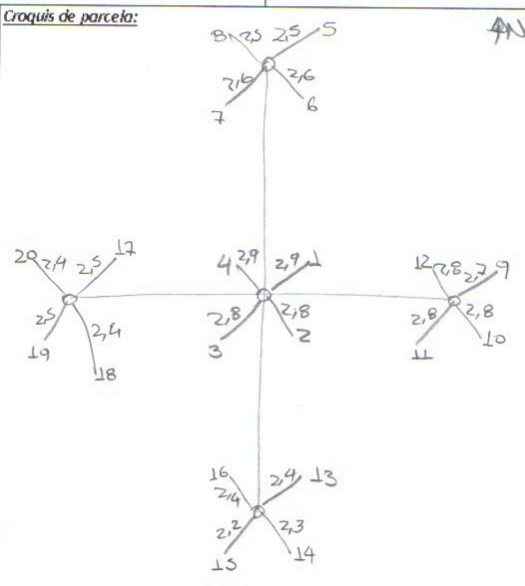
Croquis de parcela:

OBSERVACIONES

Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.

40° 15' 53" N
3° 36' 0" W.



															
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION															
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID		COMUNIDAD: MADRID		MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA								
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 01.04.2015		NOMBRE DEL TÉCNICO: Belén Nóbua		FOTOGRAFÍA/LÍNEA #								
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	METODOLOGÍA		SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO										
10	4457333	449085	TRAC												
ALTURA ELIPSoidal 620			DHP												
			ALOMETRIA		X										
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: 1: 78 cm. 2: 50 cm. 3: 76 cm. 4: 49 cm. 5: 78 cm. 6: 72 cm. 7: 70 cm. 8: 87 cm. 9: 62 cm. 10: 72 cm. 11: 70 cm. 12: 56 cm. 13: 56 cm. 14: 42 cm. 15: 64 cm. 16: 68 cm. 17: 39 cm. 18: 55 cm. 19: 56 cm. 20: 48 cm. Horas de Inicio: Horas de Finalización:								Croquis de parcela: 							
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. 40° 15' 53" N 3° 35' 55" W															

HOJA DE CAMPO
LEVANTAMIENTO DE INFORMACION

PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTIN DE LA VEGA
UBICACION: HOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 02/04/2015	NOMBRE DEL TECNICO: Santiago Rojas	FOTOGRAFIA/LÍNEA #
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE			
11	4454401	460720			
ALTURA ELIPSOIDAL 581					
MÉTODOLÓGIA			SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO		
TRAC					
DHP					
ALOMETRIA			X		

DESCRIPCION:

Diámetro a Altura de Pecho:

1: 69	13:46
2: 43	14: 87
3: 47	16: 44
4: 70	16: 75
5: 83	17: 49
6: 53	18: 43
7: 68	19: 49
8: 67	20: 74
9: 69	
10: 62	
11: 41	
12: 60	

Hora de Inicio:



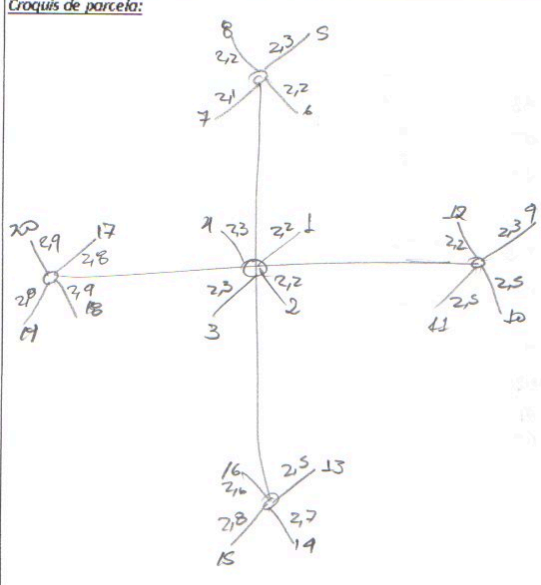
Hora de Finalización:

Croquis de parcela:



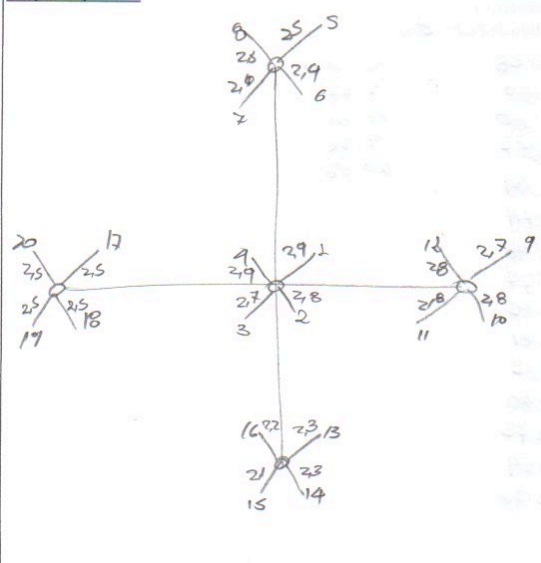
OBSERVACIONES

Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM: 40°14'19"N 3°34'45"W.



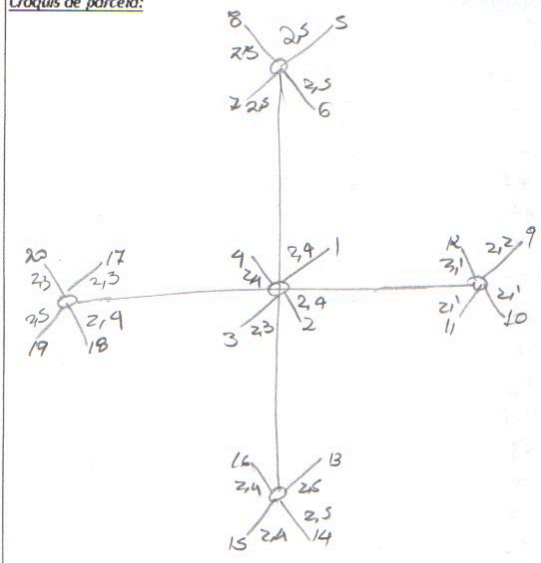


							
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION							
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID		COMUNIDAD: MADRID		MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 02/04/2015		NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas		FOTOGRAFÍA/LÍNEA #
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	METODOLOGÍA		SELECCIONAR METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO		
12	4455609	449572	TRAC				
ALTURA ELIPSoidal 693			DHP				
			ALOMETRIA		X		
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho:				Croquis de parcela:			
1: 73 2: 65 3: 94 4: 67 5: 73 6: 58 7: 99 8: 62 9: 84 10: 08 11: 53 12: 79 13: 68 14: 84 15: 61							
Hora de inicio: Hora de finalización:							
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.				40° 14' 58" N 3° 35' 34" W.			





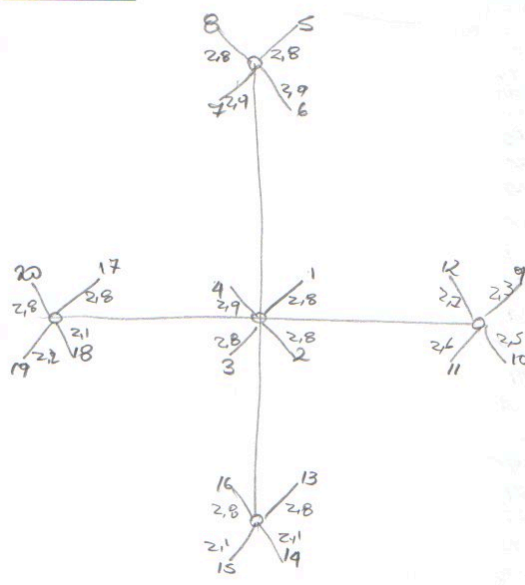
 HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION 			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA: 02/09/2015	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas		FOTOGRAFIA/LÍNEA#	
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	
13	4455714	449760	
MÉTODOLÓGIA		SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO	
TRAC			
DHP			
ALOMETRIA		X	
ALTURA ELIPSOIDAL 593			
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: cm		Croquis de parcela:	
1: 97 2: 61 3: 61 4: 77 5: 66 6: 110 7: 94 8: 63 9: 56 10: 63 11: 109 12: 79 13: 91 14: 68 15: 63 16: 64 17: 51 18: 94 19: 58 20: 59			
Hora de Inicio: Hora de Finalización:			
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-83 con proyección UTM.			



							
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION							
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID		COMUNIDAD: MADRID		MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 02/04/2015		NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas		FOTOGRAFIA/LÍNEA #
NÚMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	METODOLOGÍA		SELECCIONAR METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO		
14	AA55901	449958	TRAC				
ALTURA ELIPSoidal 582			DHP				
			ALOMETRIA		X		
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: 04				Croquis de parcela:			
1: 58 2: 60 3: 60 4: 57 5: 74 6: 74 7: 46 8: 77 9: 65 10: 61 11: 64 12: 80 13: 75 14: 69 15: 46 16: 66 17: 67 18: 61 19: 82 20: 68							
Hora de Inicio: Hora de Finalización:							
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.				40°15'07"N 3°35'18"W			



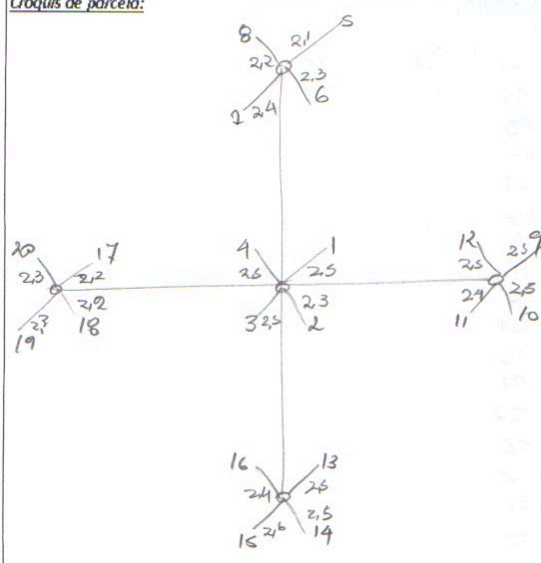
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION					
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 02/04/2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas	FOTOGRAFIA/LÍNEA #
NUMERO DE PUNTO 15	NORTE 4455963	ESTE 449630	MÉTODOLÓGIA TRAC		
ALTURA ELIPSOIDAL 609			SELECCIONAR METODOLÓGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO DHP		
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: CM 1: 85 2: 76 3: 49 4: 56 5: 65 6: 84 7: 69 8: 60 9: 61 10: 81 11: 52 12: 101 13: 91 14: 64 15: 61 16: 90 17: 71 18: 77 19: 77 20: 96			Croquis de parcela: 		
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. 40°15'09"N 3°35'32"W					



 HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION 			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA: 02/09/2015	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas		FOTOGRAFÍA/LÍNEA #	
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	
16	4456664	449572	
MÉTODOLÓGIA		SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO	
TRAC			
DHP			
ALOMETRIA		7	
ALTURA ELIPSoidal 612			
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: cm, 1: 70 19: 55 2: 75 20: 82 3: 52 4: 92 5: 69 6: 93 7: 89 8: 84 9: 56 10: 77 11: 77 12: 84 13: 100 14: 88 15: 96 16: 96 17: 47 18: 70			
Croquis de parcela: 			
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. 40°15'32"N 3°35'34"W			



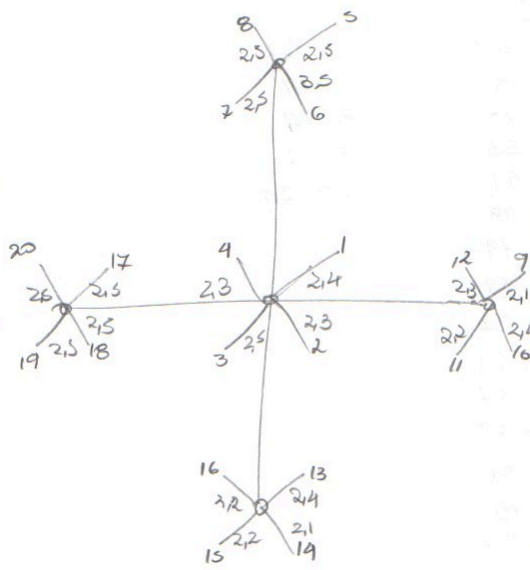
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION					
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMAGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 02/04/2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas	FOTOGRAFIA/LÍNEA #
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	MÉTODOLÓGIA		
17	4455410	448799	SELECCIONAR METODOLÓGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO		
ALTURA ELIPSOIDAL 586			TRAC		
			DHP		
			ALOMETRIA		
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: 1: 62 2: 55 3: 83 4: 62 5: 79 6: 106 7: 76 8: 71 9: 78 10: 74 11: 75 12: 99 13: 77 14: 56 15: 69 16: 83 17: 87 18: 59 19: 70 20: 95			Croquis de parcela: 		
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. 40°15'01"N 3°36'04"W.					





 HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION 			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA: 02/01/2015	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
NOMBRE DEL TÉCNICO: Sotelo Rps		FOTOGRAFÍA/LÍNEA #	
MÉTODOLÓGIA	SELECCIONAR METODOLOGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO		
TRAC			
DHP			
ALOMETRIA	<input checked="" type="checkbox"/>		
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	
18	44 55918	44 8794	
ALTURA ELIPSoidal 591 m			
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho:		Croquis de parcela:	
1: 79 2: 50 3: 71 4: 78 5: 51 6: 72 7: 48 8: 41 9: 68 10: 67 11: 54 12: 49 13: 56 14: 74 15: 78 16: 84 17: 62 18: 85 19: 46 20: 58			
Hora de Inicio: Hora de Finalización:			
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. 40°15'07"N 3°36'07"W			

HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION					
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMAGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 02/04/2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas	FOTOGRAFIA/LÍNEA #
NUMERO DE PUNTO 19	NORTE 4455302	ESTE 449986	METODOLOGÍA TRAC		
ALTURA ELIPSOIDAL 592			SELECCIONAR METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO DHP ALOMETRIA		
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho: 1: 109 2: 65 3: 70 4: 53 5: 49 6: 48 7: 79 8: 69 9: 57 10: 54 11: 67 12: 79 13: 61 14: 65 15: 65 16: 47 17: 61 18: 64 19: 52 20: 74			Croquis de parcela: 		
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.			40° 14'48"N 3°35'16"W.		





 HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION 			
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR		PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER		FECHA: 02/04/15	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA
NOMBRE DEL TÉCNICO: Gutiérrez Rojas		FOTOGRAFÍA/LÍNEA #	
NÚMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	
20	4455006	450324	
MÉTODOLÓGIA		SELECCIONAR METODOLÓGIA UTILIZADA EN EL PROYECTO	
TRAC			
DHP			
ALOMETRIA		<input checked="" type="checkbox"/>	
ALTURA ELIPSoidal 568			
DESCRIPCIÓN: Diámetro a Altura de Pecho:		Croquis de parcela:	
1: 60 2: 66 3: 59 4: 60 5: 80 6: 58 7: 80 8: 65 9: 76 10: 53 11: 68 12: 98 13: 84 14: 63 15: 68 16: 99 17: 65 18: 86 19: 56 20: 74			
Hora de Inicio: Hora de Finalización:			
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.			
40° 14' 38" N 3° 35' 02" W			





																															
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION																															
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR				PROVINCIA: MADRID		COMUNIDAD: MADRID																									
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER				FECHA: 10/04/2013		NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas																									
MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA				FOTOGRAFÍA/LÍNEA #																											
NÚMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	METODOLOGÍA		SELECCIONAR METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO																										
			TRAC		X																										
ALTURA ELIPSoidal			DHP																												
			ALOMETRIA																												
DESCRIPCIÓN: Diámetro a Altura de Pecho: <table border="1"><thead><tr><th>Parcela</th><th>NORTE</th><th>ESTE</th><th>Inicio</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>4457622</td><td>447839</td><td>12:57</td></tr><tr><td>2</td><td>4457460</td><td>447940</td><td>15:26</td></tr><tr><td>4</td><td>4457559</td><td>447850</td><td>15:30</td></tr><tr><td>3</td><td>4457263</td><td>447857</td><td>16:25</td></tr><tr><td>1</td><td>4457622</td><td>447839</td><td>16:50</td></tr></tbody></table>				Parcela	NORTE	ESTE	Inicio	1	4457622	447839	12:57	2	4457460	447940	15:26	4	4457559	447850	15:30	3	4457263	447857	16:25	1	4457622	447839	16:50	Croquis de parcela:			
Parcela	NORTE	ESTE	Inicio																												
1	4457622	447839	12:57																												
2	4457460	447940	15:26																												
4	4457559	447850	15:30																												
3	4457263	447857	16:25																												
1	4457622	447839	16:50																												
OBSERVACIONES: Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. Se Reporta Parcela 1																															



																																															
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION																																															
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR			PROVINCIA: MADRID		COMUNIDAD: MADRID		MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA																																								
UBICACION: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER			FECHA: 17/04/2015		NOMBRE DEL TECNICO: Santiago Rojas		FOTOGRAFIA/LÍNEA#																																								
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE																																													
			METODOLOGÍA		SELECCIONAR METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO																																										
			TRAC																																												
			DHP																																												
			ALOMETRIA																																												
ALTURA ELIPSOIDAL																																															
DESCRIPCION: Diámetro a Altura de Pecho:				Croquis de parcela:																																											
<table border="1"><thead><tr><th>Parcela</th><th>Norte</th><th>Este</th><th>Inicio</th></tr></thead><tbody><tr><td>5</td><td>4457210</td><td>447607</td><td>10:46</td></tr><tr><td>6</td><td>4457074</td><td>447617</td><td>11:01</td></tr><tr><td>7</td><td>4456985</td><td>448106</td><td>11:25</td></tr><tr><td>8</td><td>4457308</td><td>448728</td><td>12:01</td></tr><tr><td>9</td><td>4457334</td><td>448974</td><td>12:29</td></tr><tr><td>10</td><td>4457333</td><td>449085</td><td>12:46</td></tr><tr><td>11</td><td>4454431</td><td>450720</td><td>18:51</td></tr><tr><td>12</td><td>4455609</td><td>449572</td><td>17:16</td></tr><tr><td>13</td><td>4455714</td><td>449760</td><td>16:48</td></tr></tbody></table>				Parcela	Norte	Este	Inicio	5	4457210	447607	10:46	6	4457074	447617	11:01	7	4456985	448106	11:25	8	4457308	448728	12:01	9	4457334	448974	12:29	10	4457333	449085	12:46	11	4454431	450720	18:51	12	4455609	449572	17:16	13	4455714	449760	16:48				
Parcela	Norte	Este	Inicio																																												
5	4457210	447607	10:46																																												
6	4457074	447617	11:01																																												
7	4456985	448106	11:25																																												
8	4457308	448728	12:01																																												
9	4457334	448974	12:29																																												
10	4457333	449085	12:46																																												
11	4454431	450720	18:51																																												
12	4455609	449572	17:16																																												
13	4455714	449760	16:48																																												
Hora de Inicio:																																															
Hora de Finalización:																																															
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM.																																															



																																							
HOJA DE CAMPO LEVANTAMIENTO DE INFORMACION																																							
PROYECTO: ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR				PROVINCIA: MADRID	COMUNIDAD: MADRID	MUNICIPIO: SAN MARTÍN DE LA VEGA																																	
UBICACIÓN: NOR OCCIDENTE DEL MUNICIPIO FRENTE A PARQUE TEMÁTICO WARNER				FECHA: 17/04/2015	NOMBRE DEL TÉCNICO: Santiago Rojas	FOTOGRAFÍA/LÍNEA #																																	
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE		METODOLOGÍA		SELECCIONAR METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL PROYECTO																																	
				TRAC		<input checked="" type="checkbox"/>																																	
				DHP																																			
				ALOMETRIA																																			
ALTURA ELIPSOIDAL																																							
DESCRIPCIÓN: Diámetro a Altura de Pecho:				Croquis de parcela:																																			
<table border="1"><thead><tr><th>Parcela</th><th>NORTE</th><th>ESTE</th><th>Inicio</th></tr></thead><tbody><tr><td>14</td><td>4455901</td><td>449958</td><td>16:24</td></tr><tr><td>15</td><td>4455963</td><td>449680</td><td>15:58</td></tr><tr><td>16</td><td>4456664</td><td>449672</td><td>14:25</td></tr><tr><td>17</td><td>4455710</td><td>448799</td><td>13:11</td></tr><tr><td>18</td><td>4455918</td><td>448794</td><td>14:03</td></tr><tr><td>19</td><td>4456302</td><td>449986</td><td>17:36</td></tr><tr><td>20</td><td>4455006</td><td>450324</td><td>18:18</td></tr></tbody></table>				Parcela	NORTE	ESTE	Inicio	14	4455901	449958	16:24	15	4455963	449680	15:58	16	4456664	449672	14:25	17	4455710	448799	13:11	18	4455918	448794	14:03	19	4456302	449986	17:36	20	4455006	450324	18:18				
Parcela	NORTE	ESTE	Inicio																																				
14	4455901	449958	16:24																																				
15	4455963	449680	15:58																																				
16	4456664	449672	14:25																																				
17	4455710	448799	13:11																																				
18	4455918	448794	14:03																																				
19	4456302	449986	17:36																																				
20	4455006	450324	18:18																																				
Hora de Inicio: Hora de Finalización:																																							
OBSERVACIONES Los datos corresponden al Sistema de referencia ETRS-89 con proyección UTM. Seguimiento 1 de Parcela 9 No considerar.																																							



Anexo 4. Estimación de Biomasa mediante ecuación alométrica.-

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	1	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	447806	4457619	74	6.924781951	7.527550683
2	447806	4457619	96	7.495846282	8.109396203
3	447806	4457619	60	6.464652517	7.058734412
4	447806	4457619	59	6.427777492	7.021163219
5	447806	4457619	71	6.833982276	7.43503679
6	447806	4457619	68	6.739261998	7.338528277
7	447806	4457619	79	7.068232532	7.673709484
8	447806	4457619	83	7.176600847	7.784123697
9	447806	4457619	112	7.834054777	8.453989775
10	447806	4457619	109	7.774485172	8.393295548
11	447806	4457619	55	6.273748482	6.864226277
12	447806	4457619	50	6.064636771	6.651166722
13	447806	4457619	56	6.313281305	6.904505446
14	447806	4457619	56	6.313281305	6.904505446
15	447806	4457619	66	6.673764228	7.271793967
16	447806	4457619	83	7.176600847	7.784123697
17	447806	4457619	82	7.150006433	7.757027203
18	447806	4457619	49	6.020311781	6.606004916
19	447806	4457619	80	7.095830536	7.701828513
20	447806	4457619	54	6.233490245	6.823208001

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	2	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	447890	4457492	86	7.25450296	7.863496532
2	447890	4457492	67	6.706757517	7.30541014
3	447890	4457492	50	6.064636771	6.651166722
4	447890	4457492	54	6.233490245	6.823208001
5	447890	4457492	56	6.313281305	6.904505446
6	447890	4457492	66	6.673764228	7.271793967
7	447890	4457492	58	6.390272094	6.982949752
8	447890	4457492	80	7.095830536	7.701828513
9	447890	4457492	50	6.064636771	6.651166722
10	447890	4457492	83	7.176600847	7.784123697
11	447890	4457492	44	5.784168775	6.365403739
12	447890	4457492	85	7.228841705	7.837350815
13	447890	4457492	78	7.040282953	7.645232241
14	447890	4457492	61	6.50091801	7.095684565
15	447890	4457492	54	6.233490245	6.823208001
16	447890	4457492	49	6.020311781	6.606004916
17	447890	4457492	56	6.313281305	6.904505446
18	447890	4457492	112	7.834054777	8.453989775
19	447890	4457492	82	7.150006433	7.757027203
20	447890	4457492	134	8.227530989	8.854894469



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	3	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	447902	4457323	68	6.739261998	7.338528277
2	447902	4457323	68	6.739261998	7.338528277
3	447902	4457323	69	6.771291944	7.37116292
4	447902	4457323	78	7.040282953	7.645232241
5	447902	4457323	67	6.706757517	7.30541014
6	447902	4457323	52	6.1506875	6.738842013
7	447902	4457323	73	6.894930983	7.497136154
8	447902	4457323	53	6.192479475	6.781422983
9	447902	4457323	58	6.390272094	6.982949752
10	447902	4457323	83	7.176600847	7.784123697
11	447902	4457323	80	7.095830536	7.701828513
12	447902	4457323	52	6.1506875	6.738842013
13	447902	4457323	69	6.771291944	7.37116292
14	447902	4457323	78	7.040282953	7.645232241
15	447902	4457323	47	5.928881371	6.512848381
16	447902	4457323	56	6.313281305	6.904505446
17	447902	4457323	57	6.352114396	6.944071671
18	447902	4457323	64	6.606250829	7.203005975
19	447902	4457323	68	6.739261998	7.338528277
20	447902	4457323	67	6.706757517	7.30541014

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	4	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF _{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF _{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	447822	4457364	78	7.040282953	7.645232241
2	447822	4457364	56	6.313281305	6.904505446
3	447822	4457364	51	6.108083979	6.695434176
4	447822	4457364	55	6.273748482	6.864226277
5	447822	4457364	70	6.802861012	7.403327984
6	447822	4457364	68	6.739261998	7.338528277
7	447822	4457364	69	6.771291944	7.37116292
8	447822	4457364	99	7.563359681	8.178184195
9	447822	4457364	68	6.739261998	7.338528277
10	447822	4457364	128	8.127024301	8.752490304
11	447822	4457364	115	7.892049669	8.513079559
12	447822	4457364	111	7.814377404	8.433940911
13	447822	4457364	78	7.040282953	7.645232241
14	447822	4457364	46	5.881696491	6.464772692
15	447822	4457364	82	7.150006433	7.757027203
16	447822	4457364	66	6.673764228	7.271793967
17	447822	4457364	44	5.784168775	6.365403739
18	447822	4457364	59	6.427777492	7.021163219
19	447822	4457364	82	7.150006433	7.757027203
20	447822	4457364	75	6.954232224	7.55755695



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	5	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	447607	4457210	74	6.924781951	7.527550683
2	447607	4457210	80	7.095830536	7.701828513
3	447607	4457210	74	6.924781951	7.527550683
4	447607	4457210	113	7.853557237	8.473860424
5	447607	4457210	81	7.123085698	7.729598229
6	447607	4457210	76	6.983292415	7.587165772
7	447607	4457210	63	6.57169874	7.167801572
8	447607	4457210	97	7.518582365	8.132561523
9	447607	4457210	62	6.536593793	7.132033876
10	447607	4457210	98	7.541085253	8.155489245
11	447607	4457210	81	7.123085698	7.729598229
12	447607	4457210	61	6.50091801	7.095684565
13	447607	4457210	60	6.464652517	7.058734412
14	447607	4457210	107	7.733854152	8.351897451
15	447607	4457210	90	7.35424797	7.96512464
16	447607	4457210	76	6.983292415	7.587165772
17	447607	4457210	91	7.378491447	7.989825812
18	447607	4457210	80	7.095830536	7.701828513
19	447607	4457210	59	6.427777492	7.021163219
20	447607	4457210	86	7.25450296	7.863496532

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	6	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF _{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF _{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	447617	4457074	79	7.068232532	7.673709484
2	447617	4457074	78	7.040282953	7.645232241
3	447617	4457074	48	5.975072811	6.559911874
4	447617	4457074	52	6.1506875	6.738842013
5	447617	4457074	60	6.464652517	7.058734412
6	447617	4457074	57	6.352114396	6.944071671
7	447617	4457074	67	6.706757517	7.30541014
8	447617	4457074	73	6.894930983	7.497136154
9	447617	4457074	58	6.390272094	6.982949752
10	447617	4457074	71	6.833982276	7.43503679
11	447617	4457074	56	6.313281305	6.904505446
12	447617	4457074	55	6.273748482	6.864226277
13	447617	4457074	58	6.390272094	6.982949752
14	447617	4457074	70	6.802861012	7.403327984
15	447617	4457074	81	7.123085698	7.729598229
16	447617	4457074	77	7.011972723	7.616387539
17	447617	4457074	72	6.864668264	7.466302102
18	447617	4457074	79	7.068232532	7.673709484
19	447617	4457074	70	6.802861012	7.403327984
20	447617	4457074	70	6.802861012	7.403327984



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	7	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	448106	4456985	69	6.771291944	7.37116292
2	448106	4456985	72	6.864668264	7.466302102
3	448106	4456985	74	6.924781951	7.527550683
4	448106	4456985	54	6.233490245	6.823208001
5	448106	4456985	71	6.833982276	7.43503679
6	448106	4456985	63	6.57169874	7.167801572
7	448106	4456985	57	6.352114396	6.944071671
8	448106	4456985	47	5.928881371	6.512848381
9	448106	4456985	64	6.606250829	7.203005975
10	448106	4456985	69	6.771291944	7.37116292
11	448106	4456985	47	5.928881371	6.512848381
12	448106	4456985	60	6.464652517	7.058734412
13	448106	4456985	56	6.313281305	6.904505446
14	448106	4456985	59	6.427777492	7.021163219
15	448106	4456985	62	6.536593793	7.132033876
16	448106	4456985	69	6.771291944	7.37116292
17	448106	4456985	41	5.629232961	6.207542874
18	448106	4456985	70	6.802861012	7.403327984
19	448106	4456985	84	7.202876758	7.810895674
20	448106	4456985	52	6.1506875	6.738842013

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	8	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	448728	4457308	80	7.095830536	7.701828513
2	448728	4457308	97	7.518582365	8.132561523
3	448728	4457308	68	6.739261998	7.338528277
4	448728	4457308	86	7.25450296	7.863496532
5	448728	4457308	67	6.706757517	7.30541014
6	448728	4457308	98	7.541085253	8.155489245
7	448728	4457308	76	6.983292415	7.587165772
8	448728	4457308	79	7.068232532	7.673709484
9	448728	4457308	64	6.606250829	7.203005975
10	448728	4457308	65	6.640267206	7.237664551
11	448728	4457308	62	6.536593793	7.132033876
12	448728	4457308	76	6.983292415	7.587165772
13	448728	4457308	72	6.864668264	7.466302102
14	448728	4457308	85	7.228841705	7.837350815
15	448728	4457308	72	6.864668264	7.466302102
16	448728	4457308	59	6.427777492	7.021163219
17	448728	4457308	73	6.894930983	7.497136154
18	448728	4457308	52	6.1506875	6.738842013
19	448728	4457308	78	7.040282953	7.645232241
20	448728	4457308	56	6.313281305	6.904505446



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	9	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	448974	4457334	80	7.095830536	7.701828513
2	448974	4457334	58	6.390272094	6.982949752
3	448974	4457334	60	6.464652517	7.058734412
4	448974	4457334	45	5.833474499	6.415640311
5	448974	4457334	65	6.640267206	7.237664551
6	448974	4457334	56	6.313281305	6.904505446
7	448974	4457334	58	6.390272094	6.982949752
8	448974	4457334	56	6.313281305	6.904505446
9	448974	4457334	73	6.894930983	7.497136154
10	448974	4457334	53	6.192479475	6.781422983
11	448974	4457334	51	6.108083979	6.695434176
12	448974	4457334	56	6.313281305	6.904505446
13	448974	4457334	56	6.313281305	6.904505446
14	448974	4457334	47	5.928881371	6.512848381
15	448974	4457334	71	6.833982276	7.43503679
16	448974	4457334	75	6.954232224	7.55755695
17	448974	4457334	70	6.802861012	7.403327984
18	448974	4457334	70	6.802861012	7.403327984
19	448974	4457334	64	6.606250829	7.203005975
20	448974	4457334	58	6.390272094	6.982949752

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	10	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF _{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF _{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	449085	4457333	78	7.040282953	7.645232241
2	449085	4457333	50	6.064636771	6.651166722
3	449085	4457333	76	6.983292415	7.587165772
4	449085	4457333	49	6.020311781	6.606004916
5	449085	4457333	78	7.040282953	7.645232241
6	449085	4457333	72	6.864668264	7.466302102
7	449085	4457333	70	6.802861012	7.403327984
8	449085	4457333	87	7.279867547	7.889339981
9	449085	4457333	62	6.536593793	7.132033876
10	449085	4457333	72	6.864668264	7.466302102
11	449085	4457333	70	6.802861012	7.403327984
12	449085	4457333	56	6.313281305	6.904505446
13	449085	4457333	56	6.313281305	6.904505446
14	449085	4457333	42	5.682103287	6.261411344
15	449085	4457333	64	6.606250829	7.203005975
16	449085	4457333	68	6.739261998	7.338528277
17	449085	4457333	39	5.519509481	6.095747911
18	449085	4457333	55	6.273748482	6.864226277
19	449085	4457333	56	6.313281305	6.904505446
20	449085	4457333	48	5.975072811	6.559911874



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	11	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	450720	4454431	69	6.771291944	7.37116292
2	450720	4454431	43	5.733729489	6.314012203
3	450720	4454431	47	5.928881371	6.512848381
4	450720	4454431	70	6.802861012	7.403327984
5	450720	4454431	83	7.176600847	7.784123697
6	450720	4454431	53	6.192479475	6.781422983
7	450720	4454431	68	6.739261998	7.338528277
8	450720	4454431	67	6.706757517	7.30541014
9	450720	4454431	59	6.427777492	7.021163219
10	450720	4454431	62	6.536593793	7.132033876
11	450720	4454431	41	5.629232961	6.207542874
12	450720	4454431	60	6.464652517	7.058734412
13	450720	4454431	46	5.881696491	6.464772692
14	450720	4454431	87	7.279867547	7.889339981
15	450720	4454431	44	5.784168775	6.365403739
16	450720	4454431	75	6.954232224	7.55755695
17	450720	4454431	49	6.020311781	6.606004916
18	450720	4454431	43	5.733729489	6.314012203
19	450720	4454431	49	6.020311781	6.606004916
20	450720	4454431	70	6.802861012	7.403327984

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	12	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF _{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF _{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	449572	4455609	73	6.894930983	7.497136154
2	449572	4455609	65	6.640267206	7.237664551
3	449572	4455609	94	7.449654843	8.06233271
4	449572	4455609	67	6.706757517	7.30541014
5	449572	4455609	73	6.894930983	7.497136154
6	449572	4455609	58	6.390272094	6.982949752
7	449572	4455609	99	7.563359681	8.178184195
8	449572	4455609	62	6.536593793	7.132033876
9	449572	4455609	84	7.202876758	7.810895674
10	449572	4455609	58	6.390272094	6.982949752
11	449572	4455609	53	6.192479475	6.781422983
12	449572	4455609	79	7.068232532	7.673709484
13	449572	4455609	68	6.739261998	7.338528277
14	449572	4455609	84	7.202876758	7.810895674
15	449572	4455609	61	6.50091801	7.095684565
16	449572	4455609	70	6.802861012	7.403327984
17	449572	4455609	57	6.352114396	6.944071671
18	449572	4455609	70	6.802861012	7.403327984
19	449572	4455609	73	6.894930983	7.497136154
20	449572	4455609	69	6.771291944	7.37116292



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	13	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	449760	4455714	97	7.518582365	8.132561523
2	449760	4455714	61	6.50091801	7.095684565
3	449760	4455714	61	6.50091801	7.095684565
4	449760	4455714	77	7.011972723	7.616387539
5	449760	4455714	66	6.673764228	7.271793967
6	449760	4455714	110	7.794521953	8.413710607
7	449760	4455714	94	7.449654843	8.06233271
8	449760	4455714	63	6.57169874	7.167801572
9	449760	4455714	56	6.313281305	6.904505446
10	449760	4455714	63	6.57169874	7.167801572
11	449760	4455714	109	7.774485172	8.393295548
12	449760	4455714	79	7.068232532	7.673709484
13	449760	4455714	91	7.378491447	7.989825812
14	449760	4455714	68	6.739261998	7.338528277
15	449760	4455714	63	6.57169874	7.167801572
16	449760	4455714	64	6.606250829	7.203005975
17	449760	4455714	51	6.108083979	6.695434176
18	449760	4455714	94	7.449654843	8.06233271
19	449760	4455714	58	6.390272094	6.982949752
20	449760	4455714	59	6.427777492	7.021163219

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	14	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF _{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF _{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	449958	4455901	58	6.390272094	6.982949752
2	449958	4455901	60	6.464652517	7.058734412
3	449958	4455901	60	6.464652517	7.058734412
4	449958	4455901	57	6.352114396	6.944071671
5	449958	4455901	94	7.449654843	8.06233271
6	449958	4455901	74	6.924781951	7.527550683
7	449958	4455901	46	5.881696491	6.464772692
8	449958	4455901	77	7.011972723	7.616387539
9	449958	4455901	65	6.640267206	7.237664551
10	449958	4455901	61	6.50091801	7.095684565
11	449958	4455901	67	6.706757517	7.30541014
12	449958	4455901	80	7.095830536	7.701828513
13	449958	4455901	75	6.954232224	7.55755695
14	449958	4455901	59	6.427777492	7.021163219
15	449958	4455901	76	6.983292415	7.587165772
16	449958	4455901	66	6.673764228	7.271793967
17	449958	4455901	67	6.706757517	7.30541014
18	449958	4455901	64	6.606250829	7.203005975
19	449958	4455901	82	7.150006433	7.757027203
20	449958	4455901	68	6.739261998	7.338528277



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	15	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	449630	4455963	85	7.228841705	7.837350815
2	449630	4455963	76	6.983292415	7.587165772
3	449630	4455963	49	6.020311781	6.606004916
4	449630	4455963	56	6.313281305	6.904505446
5	449630	4455963	65	6.640267206	7.237664551
6	449630	4455963	84	7.202876758	7.810895674
7	449630	4455963	69	6.771291944	7.37116292
8	449630	4455963	60	6.464652517	7.058734412
9	449630	4455963	61	6.50091801	7.095684565
10	449630	4455963	81	7.123085698	7.729598229
11	449630	4455963	52	6.1506875	6.738842013
12	449630	4455963	101	7.607241391	8.222894353
13	449630	4455963	91	7.378491447	7.989825812
14	449630	4455963	64	6.606250829	7.203005975
15	449630	4455963	61	6.50091801	7.095684565
16	449630	4455963	90	7.35424797	7.96512464
17	449630	4455963	71	6.833982276	7.43503679
18	449630	4455963	77	7.011972723	7.616387539
19	449630	4455963	77	7.011972723	7.616387539
20	449630	4455963	96	7.495846282	8.109396203

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	16	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	449572	4456664	90	7.35424797	7.96512464
2	449572	4456664	75	6.954232224	7.55755695
3	449572	4456664	52	6.1506875	6.738842013
4	449572	4456664	92	7.402469963	8.014257021
5	449572	4456664	69	6.771291944	7.37116292
6	449572	4456664	93	7.426189246	8.038424104
7	449572	4456664	89	7.329733611	7.940147471
8	449572	4456664	84	7.202876758	7.810895674
9	449572	4456664	56	6.313281305	6.904505446
10	449572	4456664	77	7.011972723	7.616387539
11	449572	4456664	77	7.011972723	7.616387539
12	449572	4456664	84	7.202876758	7.810895674
13	449572	4456664	100	7.585410242	8.200651051
14	449572	4456664	68	6.739261998	7.338528277
15	449572	4456664	96	7.495846282	8.109396203
16	449572	4456664	96	7.495846282	8.109396203
17	449572	4456664	47	5.928881371	6.512848381
18	449572	4456664	70	6.802861012	7.403327984
19	449572	4456664	55	6.273748482	6.864226277
20	449572	4456664	82	7.150006433	7.757027203



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	17	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	448799	4455710	62	6.536593793	7.132033876
2	448799	4455710	55	6.273748482	6.864226277
3	448799	4455710	83	7.176600847	7.784123697
4	448799	4455710	62	6.536593793	7.132033876
5	448799	4455710	79	7.068232532	7.673709484
6	448799	4455710	106	7.713252946	8.330907312
7	448799	4455710	76	6.983292415	7.587165772
8	448799	4455710	71	6.833982276	7.43503679
9	448799	4455710	78	7.040282953	7.645232241
10	448799	4455710	74	6.924781951	7.527550683
11	448799	4455710	75	6.954232224	7.55755695
12	448799	4455710	99	7.563359681	8.178184195
13	448799	4455710	77	7.011972723	7.616387539
14	448799	4455710	56	6.313281305	6.904505446
15	448799	4455710	64	6.606250829	7.203005975
16	448799	4455710	83	7.176600847	7.784123697
17	448799	4455710	87	7.279867547	7.889339981
18	448799	4455710	59	6.427777492	7.021163219
19	448799	4455710	70	6.802861012	7.403327984
20	448799	4455710	95	7.472872121	8.08598831

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	18	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	448794	4455918	79	7.068232532	7.673709484
2	448794	4455918	50	6.064636771	6.651166722
3	448794	4455918	71	6.833982276	7.43503679
4	448794	4455918	78	7.040282953	7.645232241
5	448794	4455918	51	6.108083979	6.695434176
6	448794	4455918	72	6.864668264	7.466302102
7	448794	4455918	48	5.975072811	6.559911874
8	448794	4455918	44	5.784168775	6.365403739
9	448794	4455918	68	6.739261998	7.338528277
10	448794	4455918	67	6.706757517	7.30541014
11	448794	4455918	54	6.233490245	6.823208001
12	448794	4455918	49	6.020311781	6.606004916
13	448794	4455918	56	6.313281305	6.904505446
14	448794	4455918	74	6.924781951	7.527550683
15	448794	4455918	78	7.040282953	7.645232241
16	448794	4455918	84	7.202876758	7.810895674
17	448794	4455918	62	6.536593793	7.132033876
18	448794	4455918	85	7.228841705	7.837350815
19	448794	4455918	46	5.881696491	6.464772692
20	448794	4455918	58	6.390272094	6.982949752



Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	19	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF_{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF_{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	449986	4455302	104	7.671460971	8.288326342
2	449986	4455302	65	6.640267206	7.237664551
3	449986	4455302	70	6.802861012	7.403327984
4	449986	4455302	53	6.192479475	6.781422983
5	449986	4455302	49	6.020311781	6.606004916
6	449986	4455302	48	5.975072811	6.559911874
7	449986	4455302	79	7.068232532	7.673709484
8	449986	4455302	69	6.771291944	7.37116292
9	449986	4455302	57	6.352114396	6.944071671
10	449986	4455302	54	6.233490245	6.823208001
11	449986	4455302	67	6.706757517	7.30541014
12	449986	4455302	79	7.068232532	7.673709484
13	449986	4455302	61	6.50091801	7.095684565
14	449986	4455302	65	6.640267206	7.237664551
15	449986	4455302	65	6.640267206	7.237664551
16	449986	4455302	47	5.928881371	6.512848381
17	449986	4455302	61	6.50091801	7.095684565
18	449986	4455302	64	6.606250829	7.203005975
19	449986	4455302	52	6.1506875	6.738842013
20	449986	4455302	74	6.924781951	7.527550683

Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)					$\ln(y_i) = \beta_0 + \beta_i \cdot \ln(x_i)$	
Número de Parcela	20	Biomasa aérea total (BAT)	β_0 (fuste)	-2.5184	CF _{fuste}	1.027116061
			β_i (fuste)	2.13609		
			β_0 (BAT)	-2.0939	CF _{BAT}	1.011563233
			β_i (BAT)	2.20988		

No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	ELB _{Fuste} (kg)	ELB _{BAT} (kg)
1	450324	4455006	60	6.464652517	7.058734412
2	450324	4455006	66	6.673764228	7.271793967
3	450324	4455006	59	6.427777492	7.021163219
4	450324	4455006	60	6.464652517	7.058734412
5	450324	4455006	80	7.095830536	7.701828513
6	450324	4455006	58	6.390272094	6.982949752
7	450324	4455006	80	7.095830536	7.701828513
8	450324	4455006	65	6.640267206	7.237664551
9	450324	4455006	76	6.983292415	7.587165772
10	450324	4455006	53	6.192479475	6.781422983
11	450324	4455006	68	6.739261998	7.338528277
12	450324	4455006	98	7.541085253	8.155489245
13	450324	4455006	84	7.202876758	7.810895674
14	450324	4455006	63	6.57169874	7.167801572
15	450324	4455006	68	6.739261998	7.338528277
16	450324	4455006	99	7.563359681	8.178184195
17	450324	4455006	65	6.640267206	7.237664551
18	450324	4455006	86	7.25450296	7.863496532
19	450324	4455006	56	6.313281305	6.904505446
20	450324	4455006	74	6.924781951	7.527550683



Anexo 5. Resultados por parcelas de estudio mediante TRAC.-

Parcela 1

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona1\Proceso\zona1 comp.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 10, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 1104.0

Latitude: 40.000° 16.000' 2.0" North

Longitude: 3.000° 36.000' 4.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 11.66 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Km = G(SZA) \Omega E LAI / (\Gamma E \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Km \cos(SZA) * \Gamma E * (1 - \alpha) / \Omega E$

For this stand, the effective mean contact number $Km = 1.26$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 55.88

PAIe= 1.42 LAI = 3.73

W from data: 29.608 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 2

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona2\Proceso\zona2trc2.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 10, 2015

Block used: 4

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 302.0

Latitude: 40.000° 15.000' 58.0" North

Longitude: 3.000° 38.000' 46.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 3.21 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$K_{me} = G(SZA) \Omega E LAI / (\Gamma E \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 K_{me} \cos(SZA) * \Gamma E * (1 - \alpha) / \Omega E$

For this stand, the effective mean contact number $K_{me} = 0.45$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 45.41

PAIe= 0.64 LAI = 1.56

W from data: 6.166 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 3

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona3\Proceso\zona3.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 10, 2015

Block used: 1 , 4 , 7 , 10

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 126.0

Latitude: 40.000° 15.000' 58.0" North

Longitude: 3.000° 38.000' 46.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 11.82 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 0.88$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 50.70

PAIe= 1.11 LAI = 2.73

W from data: 47.464 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 4

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona4\Proceso\zona4.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 10, 2015

Block used: 1

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 131.0

Latitude: 40.000° 15.000' 54.0" North

Longitude: 3.000° 36.000' 49.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 2.15 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$K_{me} = G(SZA) \Omega E LAI / (\Gamma E \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 K_{me} \cos(SZA) * \Gamma E * (1 - \alpha) / \Omega E$

For this stand, the effective mean contact number $K_{me} = 0.93$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 47.01

PAIe= 1.26 LAI = 2.85

W from data: 6.281 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 5

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona5\Proceso\trac50417107.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 128.0

Latitude: 40.000° 15.000' 45.0" North

Longitude: 3.000° 36.000' 58.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 11.70 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$\text{LAI} = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 0.47$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 41.88

PAIe= 0.70 LAI = 1.62

W from data: 6.265 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 6

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona6\Proceso\trac60417109.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 4 , 6 , 8

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 128.0

Latitude: 40.000° 15.000' 45.0" North

Longitude: 3.000° 36.000' 58.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 14.63 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$K_{me} = G(SZA) \Omega E LAI / (\Gamma E \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 K_{me} \cos(SZA) * \Gamma E * (1 - \alpha) / \Omega E$

For this stand, the effective mean contact number $K_{me} = 0.56$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 39.63

PAIe= 0.87 LAI = 2.08

W from data: 7.358 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 7

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona7\Proceso\trac60417115.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 1517.0

Latitude: 40.000° 15.000' 42.0" North

Longitude: 3.000° 63.000' 37.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 10.91 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 1.42$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 36.52

PAIe= 2.28 LAI = 5.81

W from data: 15.650 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 8

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona8\Proceso\trac8.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 321.0

Latitude: 40.000° 15.000' 52.0" North

Longitude: 3.000° 36.000' 10.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 10.93 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 0.67$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 32.44

PAIe= 1.13 LAI = 2.78

W from data: 8.926 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 9

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona9\Proceso\zona9.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 3 , 5 , 7 , 9

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 244.0

Latitude: 40.000° 15.000' 53.0" North

Longitude: 3.000° 36.000' 0.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 14.52 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \Omega E LAI / (\Gamma E \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \Gamma E * (1 - \alpha) / \Omega E$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 0.73$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 30.53

PAIe= 1.26 LAI = 3.35

W from data: 29.712 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 10

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona10\Proceso\zona10.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 181.0

Latitude: 40.000° 15.000' 53.0" North

Longitude: 3.000° 35.000' 55.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 12.92 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 0.87$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 29.90

PAIe= 1.51 LAI = 3.56

W from data: 9.724 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 11

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona11\Proceso\zona11.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 206.0

Latitude: 40.000° 14.000' 19.0" North

Longitude: 3.000° 34.000' 45.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 14.56 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \Omega E LAI / (\Gamma E \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \Gamma E * (1 - \alpha) / \Omega E$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 81.66

PAIe= 1.07 LAI = 2.56

W from data: 35.857 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 12

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona12\Proceso\zona12.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 1050.0

Latitude: 40.000° 14.000' 58.0" North

Longitude: 3.000° 35.000' 34.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 13.37 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 2.13$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 63.39

PAIe= 1.91 LAI = 4.94

W from data: 45.896 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 13

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona13\Proceso\zona13.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 202.0

Latitude: 40.000° 15.000' 1.3" North

Longitude: 3.000° 35.000' 26.6" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 15.08 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 1.37$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 58.25

PAIe= 1.44 LAI = 3.48

W from data: 42.982 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 14

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona14\Proceso\zona14_2.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 4 , 6 , 8

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 207.0

Latitude: 40.000° 15.000' 7.0" North

Longitude: 3.000° 35.000' 18.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 14.73 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$\text{LAI} = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 0.76$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 53.86

PAIe= 0.90 LAI = 2.51

W from data: 10.656 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 15

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona15\Proceso\zona15.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 1476.0

Latitude: 40.000° 15.000' 9.0" North

Longitude: 3.000° 35.000' 32.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 14.30 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$K_{me} = G(SZA) \Omega E LAI / (\Gamma E \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 K_{me} \cos(SZA) * \Gamma E * (1 - \alpha) / \Omega E$

For this stand, the effective mean contact number $K_{me} = 1.46$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 49.16

PAIe= 1.91 LAI = 4.80

W from data: 35.355 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 16

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zonal6\Proceso\zonal6.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 600.0

Latitude: 40.000° 15.000' 32.0" North

Longitude: 3.000° 35.000' 34.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 14.60 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{OmegaE}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 1.10$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 35.27

PAIe= 1.80 LAI = 4.98

W from data: 27.544 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 17

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona17\Proceso\zona17.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 300.0

Latitude: 40.000° 15.000' 1.0" North

Longitude: 3.000° 36.000' 7.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 15.26 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 0.48$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 29.83

PAIe= 0.83 LAI = 2.18

W from data: 7.377 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 18

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona18\Proceso\zona18.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 7

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 229.0

Latitude: 40.000° 15.000' 7.0" North

Longitude: 3.000° 36.000' 7.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 16.56 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$\text{LAI} = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 1.02$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 32.81

PAIe= 1.72 LAI = 4.22

W from data: 10.027 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 19

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona19\Proceso\zona19.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 3 , 6 , 8 , 10

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 300.0

Latitude: 40.000° 14.000' 48.0" North

Longitude: 3.000° 35.000' 16.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 15.55 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$LAI = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{OmegaE}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 2.44$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 67.46

PAIe= 1.87 LAI = 4.74

W from data: 42.870 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Parcela 20

File created on April 19, 2015 from file C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\17 Trac_DHP\TRAC_SANTIAGO\zona20\Proceso\zona20.trc

with TRAC Windows Version 3.9.1

Data taken on April 17, 2015

Block used: 1 , 3 , 5 , 8

Needle-to-shoot ratio (GammaE): 2.08

Woody to total ratio (ALPHA): 0.07

Distance between markers: 20.00 m

Above PPFD: 339.0

Latitude: 40.000° 14.000' 38.0" North

Longitude: 3.000° 35.000' 2.0" West

Long Ref: 3.000° 0.000' West

Longitude reference time + 1 hour

Mean interval resolution at sensor 15.62 cm

This file provides clumping index OmegaE at various
characteristic leaf width in mm and the mean contact number Km

$Kme = G(SZA) \text{ OmegaE LAI} / (\text{GammaE} * \cos(SZA))$

We can therefore obtain LAI by assuming $G(\text{all angles})=0.5$:

$\text{LAI} = 2 Kme \cos(SZA) * \text{GammaE} * (1 - \text{Alpha}) / \text{Omega}$

For this stand, the effective mean contact number $Kme = 3.30$

Mean Solar Zenith Angle in the transect = 75.18

PAIe= 1.69 LAI = 4.22

W from data: 50.235 mm

Mean element width used: 5.0 mm



Anexo 6. Análisis de regresión no lineal para imágenes ALOSPALSAR.-

* Regresión no lineal.

MODEL PROGRAM A0=0.1 A1=0.1 A2=0.1 B1=0.1 B2=0.1 C1=0.1 C2=0.1.

COMPUTE PRED_=A0 + A1 * S0hvalos * SIN(Ang_incre) + (A2 * (S0hvalos * SIN(Ang_incre) ** 2)) + B1 * S0hhalos * COS(Ang_incre) + (B2 * (S0hhalos * COS(Ang_incre) ** 2)) + C1 * S0vvalos * COS(Ang_incre) + (C2 * (S0vvalos * COS(Ang_incre) ** 2)).

NLR LOG10Ws

/OUTFILE='C:\Users\SANTIAGO\AppData\Local\Temp\spss3908\SPSSFNLR.TMP'

/PRED PRED_

/CRITERIA ITER 20 SS CONVERGENCE 1E-8 PCON 1E-8.

Análisis de regresión no lineal

Notas	
Resultados creados	24-APR-2015 19:38:05
Comentarios	
	C:\personales\02
	Maestria\03 MAESTRIA
	UPM\05 TRABAJO FIN
	DE MASTER\16
	SPSS\DATOS_ALOS.sa
	v
Entrada	
Conjunto de datos activo	Conjunto_de_datos1
Filtro	<ninguno>
Peso	<ninguno>
Dividir archivo	<ninguno>
Núm. de filas del archivo de trabajo	20
Definición de perdidos	Los valores perdidos definidos por el usuario se tratarán como perdidos.
	Los estadísticos se basan en aquellos casos que no tienen ningún valor perdido para ninguna de las variables utilizadas. Los valores pronosticados se calculan para los casos con valores perdidos en la variable dependiente.
Tratamiento de los datos perdidos	
Casos utilizados	

Sintaxis		<p>MODEL PROGRAM</p> <p>A0=0.1 A1=0.1 A2=0.1</p> <p>B1=0.1 B2=0.1 C1=0.1</p> <p>C2=0.1.</p> <p>COMPUTE PRED_=A0</p> <p>+ A1 * S0hvalos *</p> <p>SIN(Ang_incre) + (A2 *</p> <p>(S0hvalos *</p> <p>SIN(Ang_incre) ** 2)) +</p> <p>B1 * S0hhalos *</p> <p>COS(Ang_incre) + (B2 *</p> <p>(S0hhalos *</p> <p>COS(Ang_incre) ** 2)) +</p> <p>C1 * S0vvalos *</p> <p>COS(Ang_incre) + (C2 *</p> <p>(S0vvalos *</p> <p>COS(Ang_incre) ** 2)).</p> <p>NLR LOG10Ws</p> <p>/OUTFILE='C:\Users\SANTIAGO\AppData\Local\Temp\spss3908\SPSSF</p> <p>NLR.TMP'</p> <p>/PRED PRED_</p> <p>/CRITERIA ITER 20</p> <p>SSCONVERGENCE 1E-</p> <p>8 PCON 1E-8.</p>
Recursos	Tiempo de procesador	00:00:00.02
	Tiempo transcurrido	00:00:00.03
Archivos guardados	Archivo de estimaciones de los parámetros	C:\Users\SANTIAGO\AppData\Local\Temp\spss3908\SPSSFNLR.TMP

[Conjunto_de_datos1] C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\16 SPSS\DATOS_ALOS.sav

Historial de iteraciones

Número de iteraciones	Suma de cuadrados residual	Parámetro						
		A0	A1	A2	B1	B2	C1	C2
1.0	699,600	,100	,100	,100	,100	,100	,100	,100
1.1	,007	6,739	,123	,157	,158	,282	,006	-,015
2.0	,007	6,739	,123	,157	,158	,282	,006	-,015
2.1	,007	6,739	,123	,157	,158	,282	,006	-,015



Estimaciones de los parámetros

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
A0	6,739	,081	6,564	6,914
A1	,123	,075	-,039	,285
A2	,157	,090	-,037	,352
B1	,158	,087	-,030	,347
B2	,282	,146	-,034	,597
C1	,006	,069	-,144	,156
C2	-,015	,120	-,274	,244

Correlaciones de las estimaciones de los parámetros

	A0	A1	A2	B1	B2	C1	C2
A0	1,000	-,245	-,175	,008	,009	-,124	-,101
A1	-,245	1,000	,997	,491	,493	,520	,541
A2	-,175	,997	1,000	,505	,507	,518	,539
B1	,008	,491	,505	1,000	,997	-,458	-,435
B2	,009	,493	,507	,997	1,000	-,459	-,439
C1	-,124	,520	,518	-,458	-,459	1,000	,996
C2	-,101	,541	,539	-,435	-,439	,996	1,000

ANOVA

Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	906,973	7	129,568
Residual	,007	13	,001
Total sin corrección	906,979	20	
Total corregido	,015	19	

Variable dependiente: Logaritmo en base 10 de la Estimación de biomasa del fuste obtenido por ecuaciones alométricas

$R^2 = 1 - (\text{Suma de cuadrados residual}) / (\text{Suma corregida de cuadrados}) = .540_a$

Anexo 7. Análisis de regresión no lineal para imágenes RADARSAT-2.-

* Regresión no lineal.

MODEL PROGRAM A0=0.1 A1=0.1 A2=0.1 B1=0.1 B2=0.1 C1=0.1 C2=0.1.

COMPUTE PRED_=A0 + A1 * S0hvradsat * COS(Ang_incre) + (A2 * (S0hvradsat *
COS(Ang_incre) ** 2)) + B1 * S0hhradsat * SIN(Ang_incre) + (B2 * (S0hhradsat *
SIN(Ang_incre) ** 2)) + C1 * S0vvradarsat * COS(Ang_incre) + (C2 * (S0vvradarsat *
COS(Ang_incre) ** 2)).

NLR LOG10Wc

/OUTFILE='C:\Users\SANTIAGO\AppData\Local\Temp\spss3908\SPSSFNLR.TMP'

/PRED PRED_

/CRITERIA ITER 20 SS CONVERGENCE 1E-8 PCON 1E-8.

Análisis de regresión no lineal

Notas	
Resultados creados	24-APR-2015 19:59:23
Comentarios	
Datos	C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\16 SPSS\DATOS_RADARS AT.sav
Entrada	Conjunto de datos activo
	Filtro
	Peso
	Dividir archivo
	Núm. de filas del archivo de trabajo
	20
	Definición de perdidos
Tratamiento de los datos perdidos	Los valores perdidos definidos por el usuario se tratarán como perdidos. Los estadísticos se basan en aquellos casos que no tienen ningún valor perdido para ninguna de las variables utilizadas. Los valores pronosticados se calculan para los casos con valores perdidos en la variable dependiente.
	Casos utilizados



Sintaxis		<pre>MODEL PROGRAM A0=0.1 A1=0.1 A2=0.1 B1=0.1 B2=0.1 C1=0.1 C2=0.1. COMPUTE PRED_=A0 + A1 * S0hvradsat * COS(Ang_incre) + (A2 * (S0hvradsat * COS(Ang_incre) ** 2)) + B1 * S0hhradsat * SIN(Ang_incre) + (B2 * (S0hhradsat * SIN(Ang_incre) ** 2)) + C1 * S0vvradsat * COS(Ang_incre) + (C2 * (S0vvradsat * COS(Ang_incre) ** 2)). NLR LOG10Wc /OUTFILE='C:\Users\SA NTIAGO\AppData\Local\ Temp\spss3908\SPSSF NLR.TMP' /PRED PRED_ /CRITERIA ITER 20 SSCONVERGENCE 1E- 8 PCON 1E-8.</pre>
Recursos	Tiempo de procesador	00:00:00.03
	Tiempo transcurrido	00:00:00.06
Archivos guardados	Archivo de estimaciones de los parámetros	C:\Users\SANTIAGO\Ap pData\Local\Temp\spss3 908\SPSSFNLR.TMP

[Conjunto_de_datos2] C:\personales\02 Maestria\03 MAESTRIA UPM\05 TRABAJO FIN DE MASTER\16 SPSS\DATOS_RADARSAT.sav

Historial de iteraciones

Número de iteraciones	Suma de cuadrados residual	Parámetro						
		A0	A1	A2	B1	B2	C1	C2
1.0	581,687	,100	,100	,100	,100	,100	,100	,100
1.1	,021	1,327	-,569	1,358	-,209	,222	,422	-1,145
2.0	,021	1,327	-,569	1,358	-,209	,222	,422	-1,145
2.1	,021	1,327	-,569	1,358	-,209	,222	,422	-1,145

Estimaciones de los parámetros

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
A0	1,327	,193	,911	1,743
A1	-,569	,173	-,942	-,196
A2	1,358	,465	,353	2,362
B1	-,209	,382	-1,035	,617
B2	,222	,410	-,663	1,107
C1	,422	,268	-,157	1,001
C2	-1,145	,738	-2,740	,450

Correlaciones de las estimaciones de los parámetros

	A0	A1	A2	B1	B2	C1	C2
A0	1,000	,241	-,151	-,141	,151	-,067	,108
A1	,241	1,000	-,990	-,118	,123	-,806	,805
A2	-,151	-,990	1,000	,098	-,103	,819	-,820
B1	-,141	-,118	,098	1,000	-1,000	,620	-,628
B2	,151	,123	-,103	-1,000	1,000	-,625	,633
C1	-,067	-,806	,819	,620	-,625	1,000	-,997
C2	,108	,805	-,820	-,628	,633	-,997	1,000

ANOVA

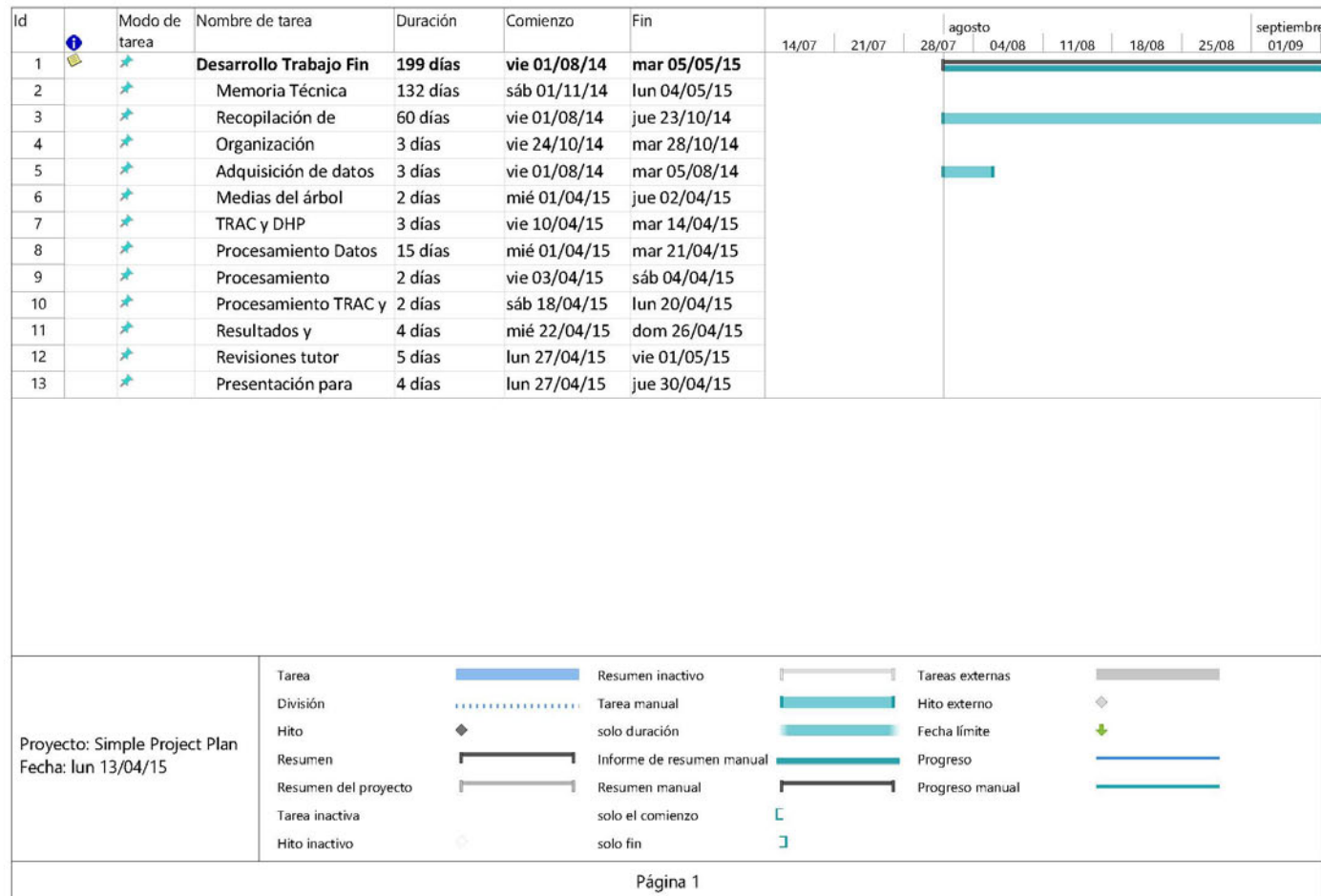
Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	61,830	7	8,833
Residual	,021	13	,002
Total sin corrección	61,851	20	
Total corregido	,051	19	

Variable dependiente: Logaritmo en base 10 de la Estimación de biomasa foliar obtenido por técnicas TRAC y DHP

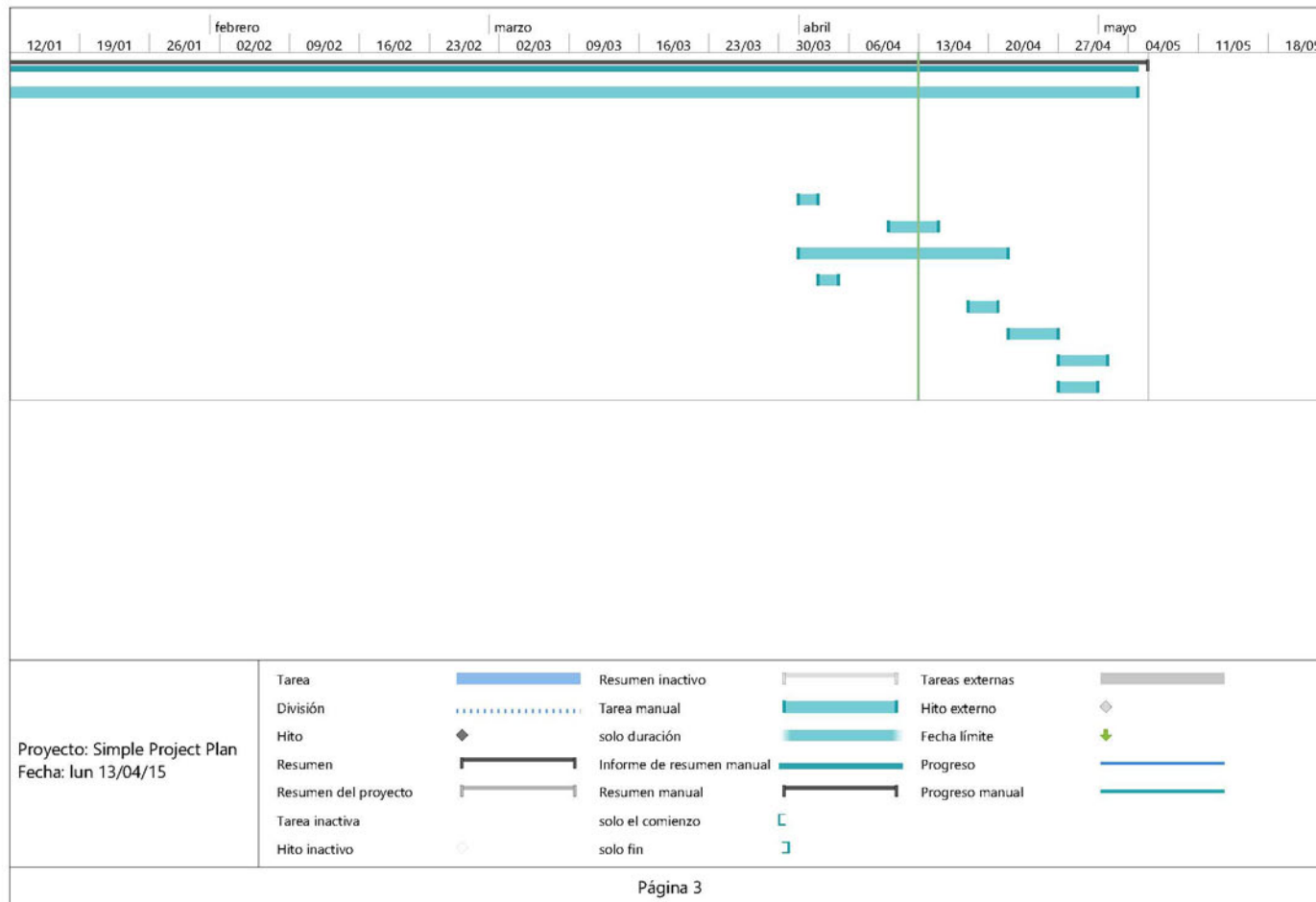
$R^2 = 1 - (\text{Suma de cuadrados residual}) / (\text{Suma corregida de cuadrados}) = .590_a$



Anexo 8. Cronograma y Presupuestos.-









ITEM	UNIDADES	COSTO UNITARIO	DIAS DE USO	COSTO TOTAL
MEDIDAS EN CAMPO				
Personal	4	30	5	600
Movilización	1	30	5	150
Alimentación	4	10	5	200
Cámara fotográfica	1	15	5	75
GPS navegador	1	20	5	100
MATERIALES UTILIZADOS				
Imagen ALOSPALSAR	1	600		600
Imagen RADARSAT-2	1	4000		4000
Equipo TRAC	1	2000		2000
Equipo DHP	1	1200		1200
Jalones	6	20		120
Cintas	2	15		30
Masetas	1	5		5
OFICINA				
Computador	1	350		350
Útiles de oficina	1	200		200
Presupuesto total para proyecto €				9630